

OHM 图形图像处理系列

■ 日本映像信息媒体学会 主编

三维 计算机图形学

〔日〕 中嶋正之 主编
朱 虹 译



科学出版社

www.sciencep.com

(TN-0529.0101)

责任编辑 杨 凯 崔炳哲
责任制作 魏 谨
封面设计 李 祥



● 三维计算机图形学

● 彩色图像工程

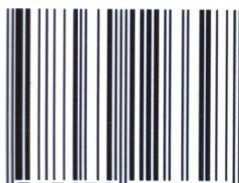
● 图像数字记录

● 纠错码及其应用

● 图像信息压缩

● 计算机图像处理

ISBN 7-03-012662-9



9 787030 126627 >

ISBN7-03-012662-9

定 价：24.50元

图字: 01-2003-4422

内 容 简 介

本书是“OHM 图形图像处理系列”之一。本书主要以三维空间的物体为研究对象,针对三维图像处理,介绍了先进的计算方法及实际应用中的例子。其中包括计算机图形学基础、造型基础、造型方法、体绘制方法、光照模型与辐射度法、分形、自然物体的生成方法、人体的 CG 表示与应用,以及计算机动画、影像的制作方法、三维计算机图形学硬件系统、计算机图形学的最新动态。

本书图文并茂,内容翔实,可供从事计算机图形图像处理的技术人员参考,也可作为大专院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

三维计算机图形学/(日)中嶋正之主编;朱虹译. —北京:科学出版社,2004

(OHM 图形图像处理系列)

ISBN 7-03-012662-9

I. 三… II. ①中…②朱… III. 计算机图形学 IV. TP 391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 000428 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:白 羽 / 封面设计:李 祥

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

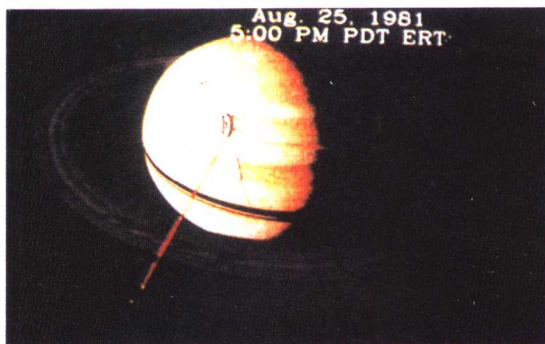
2004 年 3 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 3 月第一次印刷 印张: 6 1/4 插页 8

印数: 1—4 000 字数: 170 000

定 价: 24.50 元

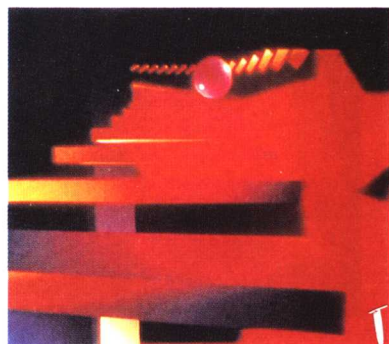
(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)



彩图1.1 卫星仿真图像

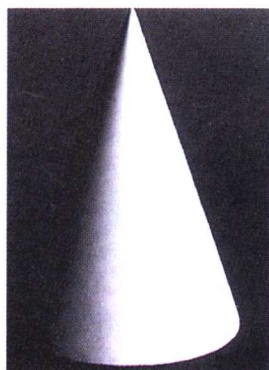


(a) 电视广告



(b) 节目主题实例 (星期二惊险剧场)

彩图1.2 CG在电视图像中的应用



彩图2.1 石膏模型与照明 (倾斜45°方向的光线)

MJ583/08

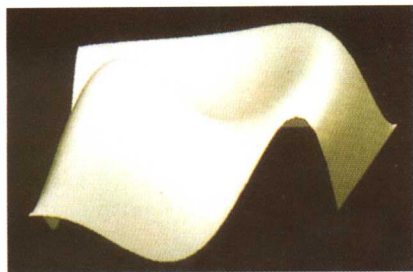


(a)



(b)

彩图2.2 平面描影及高洛德描影示例

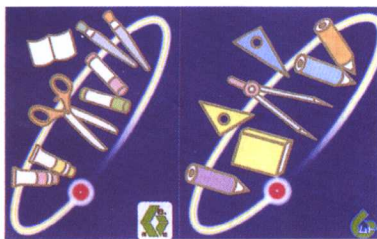


(a) $n=1$



(b) $n=5$

彩图2.3 自由曲面模型中不同 n 的表现效果

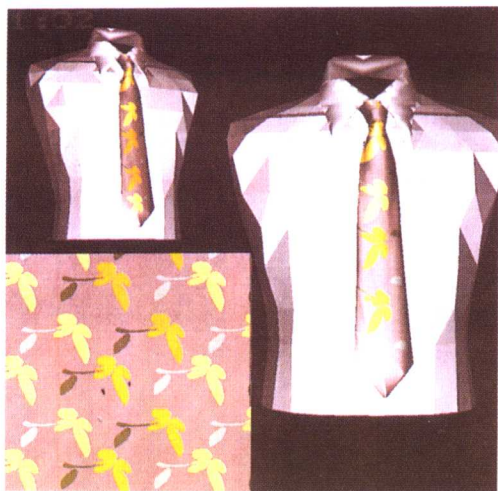


(a) 平面图形



(b) 纹理匹配示例

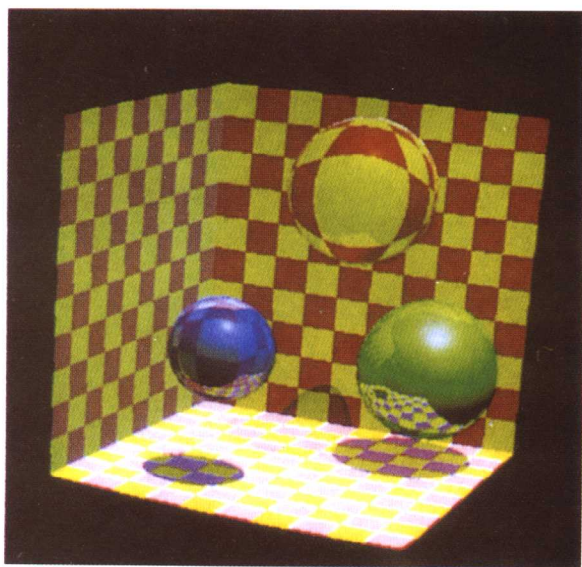
彩图2.4 纹理匹配示例——魔图案设计(筐德印刷工业(株)提供)



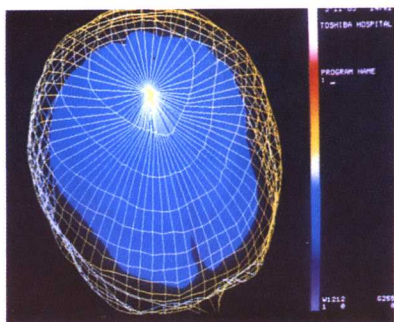
彩图2.5 曲面上的纹理匹配（东京都纤维工业实验所提供）



彩图2.6 碰撞匹配实例
（夏普（株）提供）



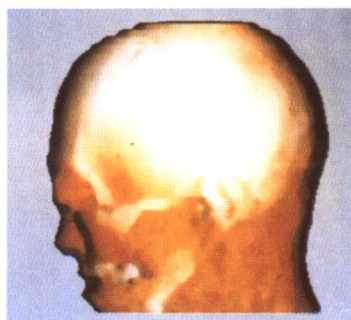
彩图3.1 光线跟踪典型图像示例



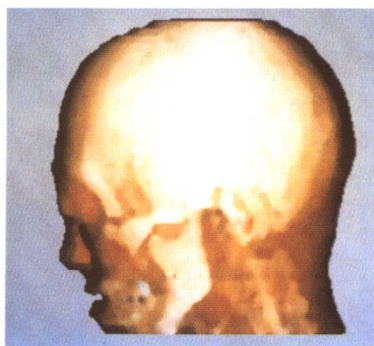
彩图4.1 基于几何模型法的三维图像



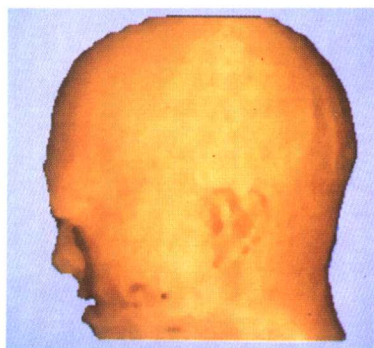
彩图4.2 基于体素模型法的三维图像



彩图4.3 体绘制仿真结果图 1



彩图4.4 体绘制仿真结果图 2



彩图4.5 体绘制仿真结果图 3



彩图5.1 点光源的计算示例



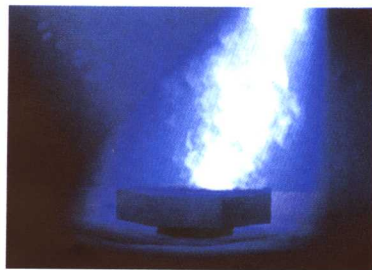
彩图5.2 面光源的计算示例



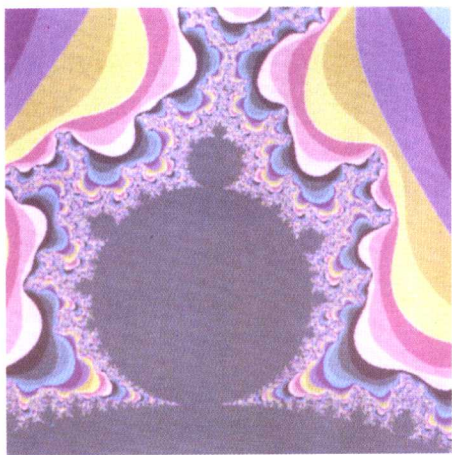
彩图5.3 自然光照射下的建筑物（福山大学图书馆）的计算示例



彩图5.4 互反射的计算示例



彩图5.5 点光源照射下烟的表示
(考虑了烟的阴影)



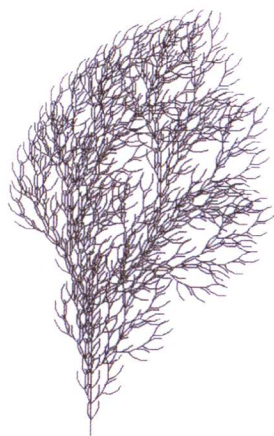
彩图6.1 Mandelbrot 集合



彩图6.2 IFS 羊齿叶



彩图6.3 分形方法生成的山



彩图6.4 分形方法生成的植物



彩图7.1 基于山脊线生长模型生成的山岳地形示例



(a)

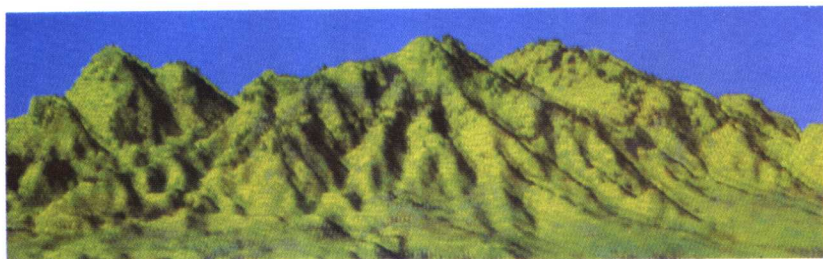


(b)

彩图7.2 具有向阳性的树木和火焰的仿真



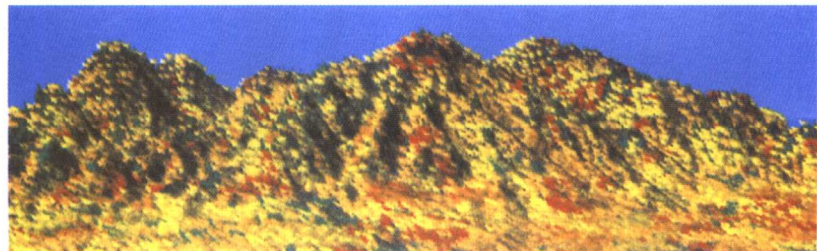
彩图7.3 具有冲破寂静与萌芽优势的树木与火焰的仿真示例



(a) 春



(b) 夏

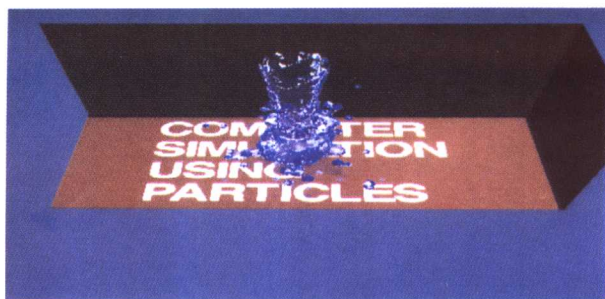


(c) 秋



(d) 冬

彩图7.4 季节与山岳景观的仿真



(a)

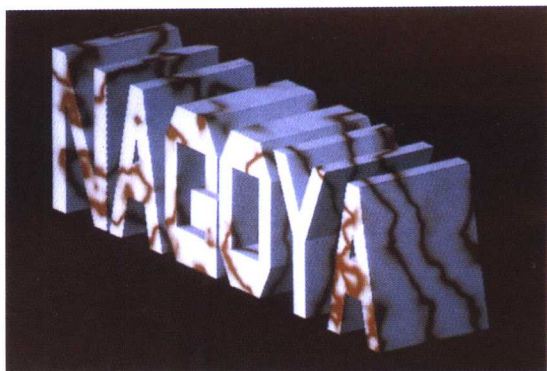


(b)



(c)

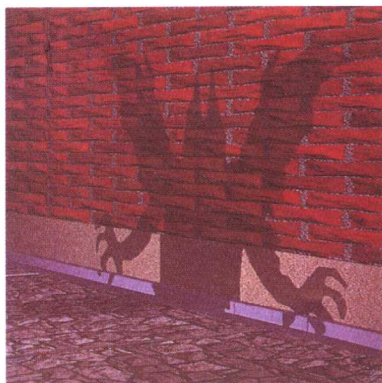
彩图7.5 水流仿真示例



彩图7.6 基于立体纹理的大理石的表现



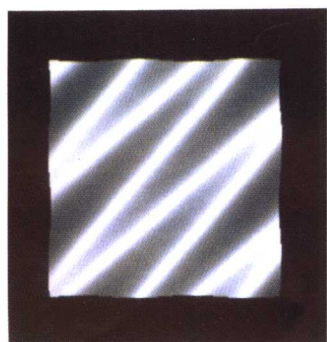
彩图7.7 江戸城（日本）



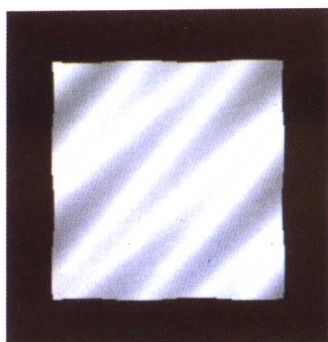
彩图7.8 鬼街



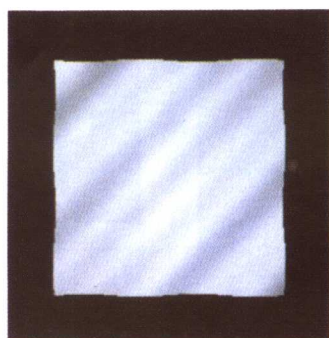
彩图7.9 釉子的细小裂纹仿真示例



(a) 化纤



(b) 丝绸

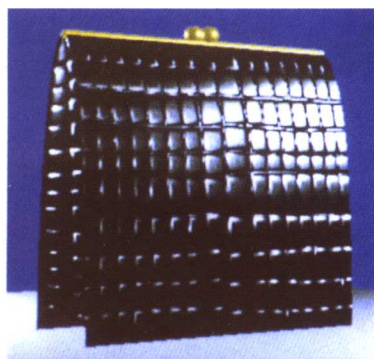


(c) 棉布

彩图7.10 布的代表示例



彩图7.11 皮肤图像的生成示例



彩图7.12 鳄鱼皮纹理的生成示例



彩图8.1 天鹅湖 (Cecile Dancing in My Dream)
(吉本圣志先生提供)



(a) 色彩数据

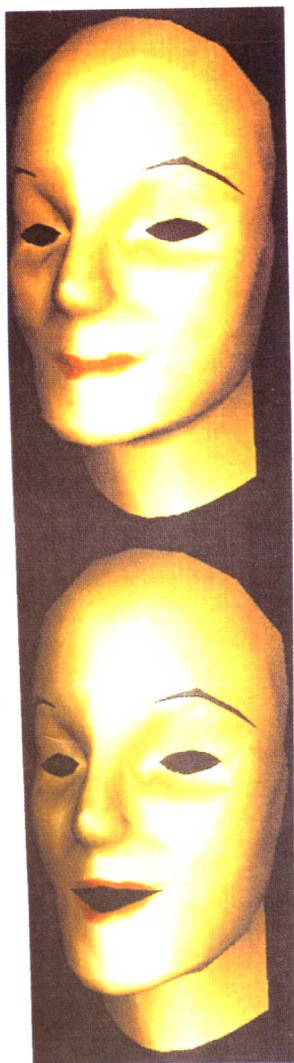


(b) 形状数据



(c) 合成结果

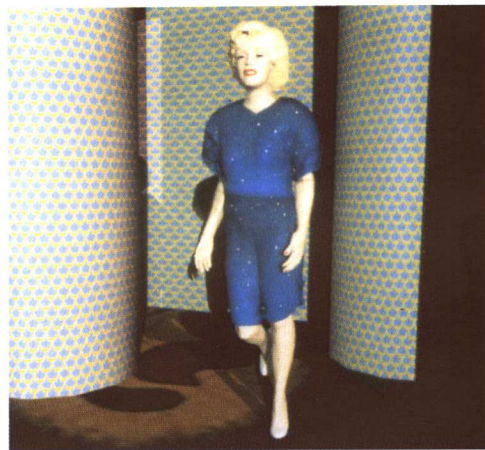
图8.2 装置的检测结果



彩图 8.3 表情生成时人脸的多边形表示造型结果示例



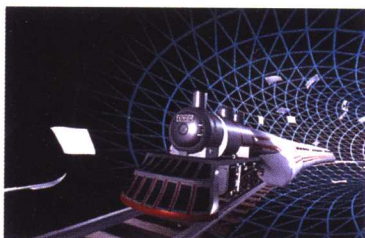
彩图8.4 头发的表现示例（栗原恒弥先生提供）



彩图8.5 衣服的表现示例（Thalmann夫妻提供）



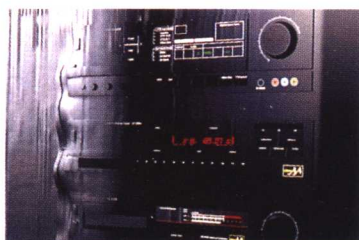
(a) “THE NATURE” ((株) 电通,
(株) INTERVOICE)



(e) “IMAGINATION” (三菱横
滨综合委员会, (株) 电通)



(b) “BS 竞技场” (东芝 (株),
(株) TOKYO AD. PARTY,
(株) CARAVAN)



(f) “松下 AV” (松下电器产业
(株), (株) 博报堂, (株)
CAP)



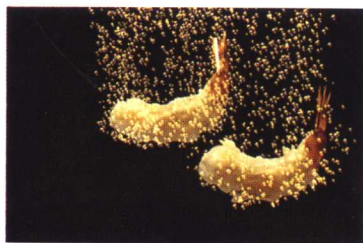
(c) “亚莉娜公主 V” (武田药品
工业 (株), (株) 博报堂,
(株) 东北新社)



(g) “豆制品” (味之素 (株),
(株) 电通, (株) CAP)



(d) 小鸟小娜的模仿 ((株)
FujiTelevision/ 美术制作
局 CG 中心)



(h) “花牌” (日清制粉 (株),
(株) 博报堂, (株) CAP)



(i) “YONSENMAN” (日产汽车 (株), (株) 博报堂, (株) PYRAMID FILM)

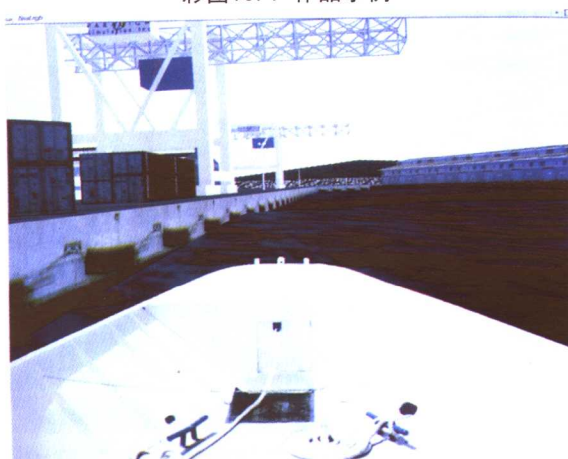


(k) “IGT” ((株) 藤田, (株) TECNIX, (株) IMAGICA)



(j) 《金属鸟》(PIONEES (株), ASATSU International Inc., SIGMA CREATIVE Inc. (株))

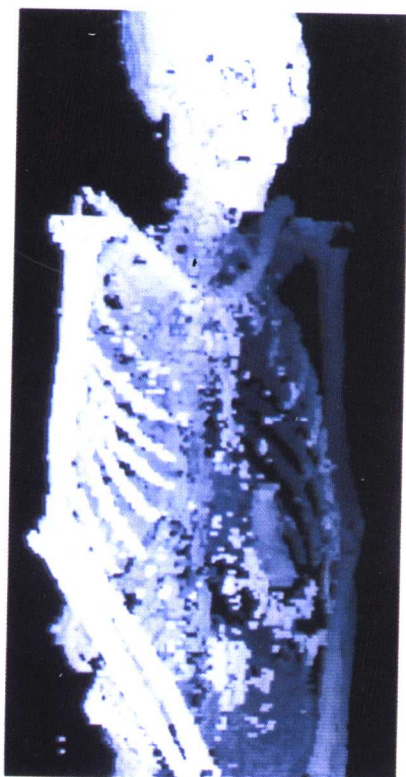
彩图10.1 作品示例



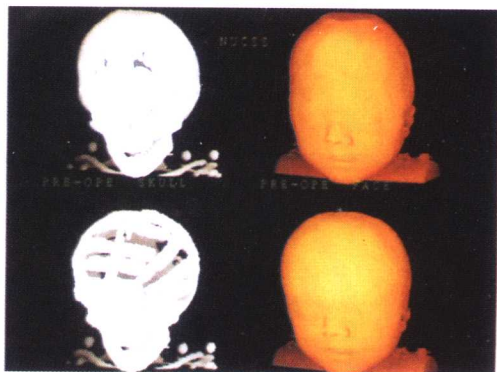
彩图11.1 船舶航行仿真 (日本SGI (株) 提供)



彩图12.1 玻璃瓶裂痕检查仿真

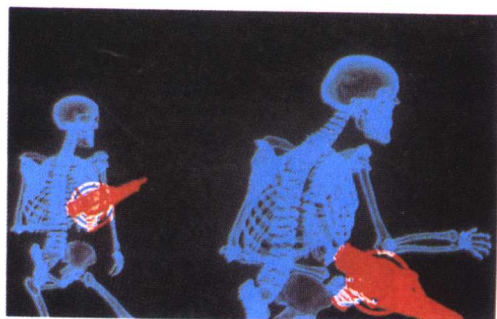


彩图 12.2 古代埃及木乃伊的可视化处理（采用 CT 方法将测得的三维图像数据表示出来）



彩图12.3 头部手术的仿真示例

（左上：手术前的骨骼图像，右上：手术前的皮肤表面图像，左下：预测的手术后骨骼图像，右下：预测的手术后的皮肤表面图像）



彩图 12.4 获得 Academy 奖的《魔鬼总动员》中的一个场面（Metro-light studio 提供）

Original Japanese language edition
Sentan Gijutsu no Tehodoki Series 3 Jigen CG
Supervised by Masayuki Nakajima
Edited by Television Gakkai
Copyright © 1994 by Eizou Jyohou Media Gakkai
Published by Ohmsha, Ltd.
This Chinese version published by Science Press, Beijing
Under license from Ohmsha, Ltd.
Copyright © 2003
All rights reserved

先端技術の手ほどきシリーズ 3 次元CG
映像情報メディア学会 オーム社 1998

原著主编和执笔者一览

主 编

中嶋正之 (东京工业大学工学部)

执笔者

中嶋正之 (东京工业大学工学部)	第 1 章, 第 12 章
近藤邦雄 (埼玉大学工学部)	第 2 章
大野义夫 (庆应义塾大学理工学部)	第 3 章
中丸幸治 (庆应义塾大学研究生院)	第 3 章
周藤安造 (东海大学开发工学部)	第 4 章
横井茂树 (名古屋大学信息文化学部)	第 4 章, 第 7 章, 第 12 章
西田友晃 (福山大学工学部)	第 5 章
官田一乘 (日本 IBM(株)东京基础研究所)	第 6 章, 第 7 章
千叶则茂 (岩手大学工学部)	第 7 章
末永康仁 (NTT 人机界面研究所)	第 8 章
福井一夫 (NHK 广播技术研究所)	第 9 章
平 正昭 (LINKS(株)制作公司本部)	第 10 章
小堀研一 (大阪工业大学工学部)	第 11 章

正如“百闻不如一见”，在各种信息交换、保存、传递等过程中，图像、影像等对于人类来说，是最最重要的手段。通过计算机生成图形的操作称为计算机图形学(CG)。随着计算机应用的普及，计算机图形学在产业、科学、电影、游戏、艺术等多个领域中起到了非常重要的作用。特别是现在，具有快速及强大图形功能的图形工作站的价格日益低廉，计算机图形学也因而得到了普及。此外，在个人计算机上的图形功能的增强，使得所有的人都可以非常轻松地进行有关计算机图形学方面的工作。

本书正是在这样的背景之下，以计算机图形学中的描述立体对象的三维计算机图形学为重点，按照比较容易理解的方式，对其最先进的算法，以及在实际中的应用实例进行具体地介绍。虽然有关计算机图形学方面的书籍已经出版不少，但其中大多数书的内容都是以 20 世纪 60 年代到 80 年代中期的计算机图形学基本算法为中心来组织的。对 20 世纪 80 年代后期，飞速发展起来的最前沿的三维计算机图形学方法(例如体绘制方法、辐射度法等)，以及最新的计算机图形学应用，以比较容易理解的方法进行解说的著作则比较少。因此本书的所有内容是由在计算机图形学领域中，从事最前沿研究开发的专家，分别担任各章内容撰写成的，将各个研究方向的最新信息以非常容易理解的方式进行介绍。

今后，随着并行计算机及大型计算机的普及，对大量的数据进行快速处理的能力将大幅度提高，人类正确理解这些数据将存在一定困难。因此，对计算机的要求不仅仅是进行简单计算，还应该对计算结果按照容易理解的方式给出，或者是将科学、物理现象进行图形化表示，这时，计算机图形学技术就显得越来越重要。此外，随着计算机的多媒体化，计算机图形学在计算机与人

前 言

之间的交互界面上的作用,也必将变得越来越显著。在这种情形之下,希望本书可以给读者带来一定的参考价值。

最后,对在百忙之中抽出时间完成本书的各位作者表示深深的感谢。本书的内容在 1992 年 1 月到 12 月之间,由电视学会进行了 12 次交流,也不断地将新的内容丰富在其中。在此,向为写作组的执笔者提出各种建议的各位电视学会编辑表示感谢。

主 编

目 录

第 1 章 计算机图形学基础

1.1 计算机图形学	1
1. 计算机图形学的诞生	2
2. 计算机图形学的应用时代	3
3. 计算机图形学的实用化时代	3
4. 计算机图形学的普及时代	3
5. 计算机图形学技术的活跃时代	4
1.2 二维计算机图形学的基本方法	4
1. 用计算机处理图形、图像	4
2. 二维计算机图形学的基本方法	5
1.3 三维计算机图形学的基础方法	7
1. 三维计算机图形学方法	7
2. 建模	8
3. 造型	8
1.4 本书的内容组织结构	10

第 2 章 造型基础

2.1 投影法	12
2.2 中心投影图	14
2.3 描影法	17
2.4 描影法模型	17
2.5 平滑描影法	20
1. 高洛德(Gouraud)描影法	20
2. 冯式(Phong)描影法	21
2.6 纹理匹配法	22
1. 匹配法的基础	22

2. 纹理匹配法	23
3. 碰撞匹配	23
参考文献	25

第3章 造型法

3.1 造型的原理	26
3.2 光的作用	29
1. 光线与物体的交点	29
2. 反射与折射	30
3. 抗混叠处理	31
3.3 造型的快速化方法	32
1. 平均代价的削减方法	32
2. 限定物体的方法	35
3. 光线的一般化方法	38
3.4 并行计算	39
参考文献	41

第4章 体绘制方法

4.1 体绘制方法的概要	42
4.2 造型技术的分类	43
4.3 体绘制方法	45
1. 图像的输入与建模	45
2. 预处理	46
3. 分 类	46
4. 明暗生成	48
5. 光线跟踪	48
4.4 自然物体的体绘制方法	50
1. 体绘制方法	50
2. 纹理元素(texel)造型方法	51
4.5 仿真实验	52
1. 处理条件	52
2. 计算方法	52

目 录

3. 实验结果	53
4.6 今后的研究课题	53
1. 数据的管理与计算量的问题	53
2. 画质的问题	53
3. 分类的问题	53
参考文献	54

第5章 光照模型与辐射度方法

5.1 光的种类与反射光	56
1. 点光源	57
2. 线光源	58
3. 面光源及多面体光源	58
4. 天空光	59
5.2 阴影的处理	59
1. 不具有扩散幅度的光源照射下的阴影的计算 ...	59
2. 具有扩散幅度的光源照射下的阴影	60
5.3 辐射度方法	63
1. 辐射度方程	64
2. 形态因子的计算	64
5.4 大气的效果	66
1. 雾层的效果	66
2. 大气泛光的表示	67
参考文献	68

第6章 分形

6.1 关于分形	69
6.2 所谓的分形	70
1. 分形图形	70
2. 分形维数	71
3. 身边的分形	73
4. Mandelbrot 集合与 Julia 集合	74
5. IFS	75

6.3 计算机图形学中的分形	76
1. 为什么分形是一个重要的理论	76
2. fBm 与中心点变位法	77
3. 分形图形及其生成规则	78
4. 粒子系统	79
参考文献	81

第 7 章 自然物体的生成方法

7.1 自然物体的计算机图形学表示方法	82
7.2 山岳的表示	85
1. 分形方法	85
2. 考虑生成机理的方法	86
7.3 树木的表示	88
1. 纹理匹配方法	88
2. 分形方法	89
3. 生长模型	90
7.4 山岳、树木的季节感的表示	92
7.5 基于粒子的仿真	92
7.6 树木摇动的表示	93
7.7 气体状物体的表示	94
1. 云的表示	95
2. 火焰、烟的表示	95
7.8 水流的表示	96
7.9 岩石的表示	97
1. 分形方法	97
2. 细小裂纹的生成方法	98
7.10 布、皮肤、皮革的表示	98
1. 布的质感的表示	98
2. 皮肤、皮革的质感表示	100
参考文献	101

第 8 章 人体的 CG 表示与应用

8.1 人与人物图像	105
------------------	-----

目 录

8.2	CG 人的诞生与成长	106
8.3	人物的 CG 表现方法	108
1.	人物图像的构成元素	108
2.	数据的输入	109
3.	形状的表现方法	112
4.	动作的表示方法	115
5.	人 脸	116
6.	头 发	117
7.	皮 肤	118
8.	衣 服	118
8.4	表情、动作的识别生成	119
8.5	面向 21 世纪	120
	参考文献	121

第 9 章 计算机动画

9.1	计算机动画的概述	127
9.2	辅助型系统	128
1.	关键帧方法	129
2.	动点约束法	130
3.	骨骼法	131
4.	变形方法	131
5.	运动控制系统	132
9.3	生成型系统	133
1.	函数法	133
2.	自由形状的变形	133
3.	多关节结构体的变形	134
9.4	实用系统的现状与未来	142
	参考文献	143

第 10 章 影像的制作方法

10.1	最新的计算机图形学	145
10.2	“壁垒”的崩塌	145

10.3	好莱坞与计算机图形学	146
10.4	高端(highend)计算机图形学	148
	1. 合成影像	148
	2. 变形动画片	149
	3. 特性动画片	149
	4. 立体影像	150
10.5	作品实例	150

第 11 章 三维计算机图形学硬件系统

11.1	计算机图形学的输入输出设备	156
	1. 平面型界限	157
	2. 空间型界面	160
11.2	图形板卡	162
11.3	图形工作站	163
11.4	GL 与 PEX	168
11.5	今后的动向	169
	参考文献	170

第 12 章 计算机图形学的最新动态

12.1	可视化技术	171
	1. 科学计算的可视化	171
	2. 景观的仿真	173
	3. 医学中的可视化	174
12.2	虚拟现实	175
	1. 计算机图形学系统与虚拟现实系统	176
	2. 虚拟现实装置的具体实例	177
	3. 广义虚拟现实系统	179
12.3	三维计算机图形学的将来	180
	参考文献	182

第 1 章

计算机图形学基础

在下一章开始介绍三维计算机图形学具体算法之前,本章先介绍计算机图形学的发展状况、二维计算机图形学技术、三维计算机图形学的基础,以及从第 2 章开始的各章内容的组织结构。

1.1 计算机图形学

所谓的计算机图形学,是研究如何用计算机以及图形图像外围设备来生成、处理和显示图像及视频的一门学科。因为可以获取人类在视觉上容易接受的多种媒体信息(如图像、视频等),所以计算机图形学在计算机应用的多个领域中被广泛使用。具有代表性的应用有机械、电气、建筑等计算机辅助设计的 CAD 系统;化学、航空、自动控制等领域中的系统响应的仿真;医学、产业、教育、艺术、计算机游戏软件等领域的各种应用。今后,其应用领域肯定还将更加广泛。

下面,简单介绍计算机图形学的发展历史,表 1.1 以最新的发展动向为中心,列出了计算机图形学的主要发展动向。

表 1.1 计算机图形学的近期发展

年份	主要的成就
1945	ENIAC 诞生
1962	画板系统(计算机图形学的诞生) (20 世纪 60 年代在美国开发出了多个实验室的作品)
1977	《星际大战》(用计算机图形学再现战争场面)
1979	木星的仿真(James Green 的作品)

续表 1.1

年份	主要的成就
1981	JCGL 研制成功(在日本完成的真正意义上的计算机图形学产品) NICOGRAPH 研制成功(计算机产业界协会研制)
1982	《TRON》(真正意义上的计算机图形学的应用) 《小鹿的故事》(第2版是世界上最早用计算机图形学技术完成的作品) “日本的四季”,“折纸”等(NHK 技术研究所开发的产品) 《A Morphological Study of the Form of Nature》 (河口洋一郎,利用表情模型)
1983	《Star Trek II /the Wrath of Khan》 (利用了分形,粒子系统等多种计算机图形学方法)
1984	“摄影师”(日本真正应用计算机图形学技术开发出的作品) 《生物传感器》(东洋 LINKS(现在的 LINKS)和大阪大学共同研制)
1985	筑波万博(计算机图形学繁荣的开始) 《宇宙》(东洋 LINKS 研制,世界上最早的计算机图形学立体 Omnimax 作品) Pixal 公司成立(曾开发出多个优秀的计算机图形学的作品) 弹钢琴的托尼(蒙特利尔大学研制的可描述情感的作品)
1986	《Luxo Jr》(Zlight 的个性动画)
1987	蒙特利尔的邂逅(Thakmann 夫妇,真正意义上的 CG 特性的诞生)
1988	日本智能化通信研究的正规化 虚拟现实的研究成为热点
1989	高清晰度电视 CG 在 SIGGRAPH 得到好评(河口洋一郎) 《惊奇的小宇宙——人体》(NHK 放映公司的作品,获 AVA 大奖)
1990	多媒体技术的研究成为热点 JPEG, MPEG, MHEG 的开发得到了飞速的发展
1991	《Total Recall》(Metro-Light Studio)获得了 Academy 特别奖 《终结者2》公映
1992	电影、电视中的变形动画效果处理(逐渐变黑或变白等) 在儿童节目中,运用计算机图形学特性和图像合成技术成为热门
1993	《UGOUGORUUGA》,《西田的出众人物传》等) 《侏罗纪公园》在日本公映

★ 1. 计算机图形学的诞生

计算机图形学,即尝试着用计算机来生成图像,起源于20世纪60年代初期,由美国贝尔研究所最先开始研究。这是一项因工程领域中的需要而开始的研究。该系统可以迅速地计算出装备有姿态控制的人造

卫星运动的角度变化,并在显示器上以图像形式对宇宙开发进行仿真。

时隔不久,在美国,许多艺术家和电子学专家进行了大量的实验,尝试着制作 CG 图像,实际上当时完成了数百个作品的制作。但是,因为当时的计算机性能和显示器的性能还比较低,要制作一个作品需要非常多的人力和时间代价,因此,还无法在大范围内普及。

☆ 2. 计算机图形学的应用时代(从 20 世纪 70 年代后期到 80 年代初期)

20 世纪 70 年代后期,真正的计算机图形学的应用成为现实,不仅仅在电视中,在电影的特技场面中也都应用了计算机图形学的技术。特别是在 1977 年的电影《星际大战》中,战争场面的特殊效果就是用计算机图形学技术制作的,展现了在以往技术下不可能出现的战争场面。1982 年上映的电影《TRON》也是非常典型的运用计算机图形学技术制作的作品。此外,1979 年,NASA 用计算机图形学技术制作的探测卫星接近木星时卫星飞行的仿真映像,在当时日本的电视节目上反复播出过。许多观众与 CG 图像一起感受着这一动人的场景(参见彩图 1.1)。

☆ 3. 计算机图形学的实用化时代(20 世纪 80 年代初期)

20 世纪 70 年代,计算机图形学在美国迎来了其鼎盛时期,从 20 世纪 80 年代起,在日本也兴起了计算机图形学的研究热潮,许多计算机图形学工具相继问世,并制作出了许多的作品,迎来了计算机图形学实用化的时代。在以往以实际拍摄为主的电视节目中,由计算机图形学技术制作的画面陆续登场,例如节目的片头、新闻的背景提示等都采用了计算机图形学技术制作的各种精美的画面(参见彩图 1.2)。到了这个时代,计算机图形学不仅仅用于片头等的制作,在事件的再现(例如航空事故的再现)中,也开始了有效的应用。

☆ 4. 计算机图形学的普及时代(20 世纪 80 年代后期)

计算机图形学技术得以进入实用化的时代,是因为超大规模集成电路和图像处理硬件及软件两方面技术的飞速发展。在 20 世纪 70 年代,用大型计算机进行计算或者制作一个作品需要几个月的时间,并且需要耗费大量的人力。因此,这类工作只能由专家来完成。到了现在,高性能的工作站,特别是图形工作站价格很便宜,因而得到了普

及。此外,随着个人计算机的图形功能的增强,无论是谁,都可以非常容易地进行 CG 作品的制作。例如具有代表性的美国 SIGGRAPH 和日本 NICOGRAPH,都配有专业版的 CG 接口,对于一般的非专业用户也设置了普及版的 CG 接口。这些技术的发展,使得高品质的作品越来越多。

★ 5. 计算机图形学技术的活跃时代(20 世纪 90 年代)

20 世纪 90 年代之后,计算机图形学技术的研究进入了活跃的时代。也就是说,计算机图形学技术被广泛地应用到了各个领域,成为一种不可或缺的研究手段。在 1991 年美国公映的《终结者 2》,1993 年公映的《侏罗纪公园》中,计算机图形学技术起到了非常重要的作用。此外,在日本的电视界,特别是儿童节目的制作中,计算机图形学技术已经成为不可缺少的部分。

现在,各种计算机图形学的应用系统(虚拟现实,多媒体技术等)已经开始逐步普及,可以说计算机图形学的研究正在走向更深入的发展。

1.2 二维计算机图形学的基本方法

计算机图形学大致可分为二维计算机图形学技术和利用计算机的数值计算能力制作立体图像的三维计算机图形学两类。本节主要介绍利用计算机处理图形或图像的二维计算机图形学的主要方法及其应用。

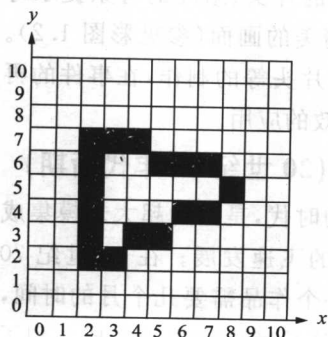


图 1.1 二维数字平面的构成

★ 1. 用计算机处理图形、图像

(1) 数字图形的表示 所谓的二维计算机图形,通常如图 1.1 所示,在水平方向(x)和垂直方向(y),按照某个幅值单位将其分割成许多正方形的方格,在方格中填入相应的值,就得到一个点集合。这个点集合就可以表示文字、线和图形。

一般情况下,在被划分后的各个区

域,水平方向确定了从左到右排列的所在列位置上的值,垂直方向确定了从下到上(或者是从上到下)排列的所在行位置上的值,水平方向上 x 的值和垂直方向上 y 的值定义为**坐标值**。这时,被分割成的每个小方格称为**像素**(pixel)。在整个画面上,即水平方向和垂直方向的像素个数的乘积称为该画面的**像素总数**,或者在显示时称为**分辨率**。

在二维计算机图形学中,对某个点赋以某个颜色值的操作是最基本的操作。基本操作还包括在两点之间引一条直线,或者对某个区域用指定的颜色值来替代等。

(2) **数字图像**的表示方法 与数字图形相同,对具有灰度级的图像,用数字计算机进行描述时,其方法原理也如图 1.1 所示。在水平方向(x)和垂直方向(y)上,按照某个幅值单位进行分割,并以整数来表示。每个最小单位的位置用(x, y)来指定,以像素为单位来描述图像的信息。

一般情况下,以像素为单位描述的图像称为**数字图像**。在数字图像上,将各个像素点的亮度作为其灰度,用灰度值来描述。

所谓的**灰度级**,是指在显示图像时,将最暗像素点的值到最亮像素点的值的区间,分成若干个级别,然后对亮度用某种码字来进行表示。灰度级是以位(bit)为单位来描述的。

灰度级的确定方法根据计算机图形学处理的目的不同而不同。当处理文字、图形等对象时,各像素的值一般用 0,1 来表示。在表示复杂立体对象的明暗分布时,至少需要用 32 到 64 灰度级来表示。通常所使用的是 8bit,即 256 灰度级的描述方法。

对于彩色图像,一般是对其红(R),绿(G),蓝(B)三原色,分别用灰度级来描述。当 R,G,B 的灰度级分别为 8bit 时,就可以逼真地显示所需要描述的色彩。这时,可以表示的色彩数是 $8 \times 3 = 24(\text{bit})$,即约 1670 万种色彩。

★ 2. 二维计算机图形学的基本方法

在二维计算机图形学系统中,构造使用户可非常方便使用的环境是非常重要的,因此如何表示所生成的精美图像,是一个非常重要的问题。这里,将介绍具有代表性的二维图像的表示方法。

(1) **抗混叠处理** 对以电视播放为目的的 CG 图像,通常在分辨

率为 640×525 像素的图像序列中进行各帧图像的处理。如果用行扫描方式对彩色图像进行显示的话,就会在斜线或者是由线条构成的图形边上出现许多台阶型的毛刺。这是因为像素数不足,即分辨率太低产生的,这种现象称为**混叠误差**。混叠误差会导致 CG 图像画质的劣化,因此,有必要对出现毛刺的边界部分进行平滑。这种提高图像画质的处理称为**抗混叠处理**(antialiasing)。

彩色数字图像的抗混叠处理的方法是,如果需要在色彩 A 与色彩 B 的边界进行平滑,则可在 RGB 空间上,将连接色彩 A 和色彩 B 的坐标点之间的直线上所排列的色彩序列,作为平滑时所使用的色彩序列。

(2) 色彩压缩 在显示 CG 图像时,如果三原色 R,G,B 分别以 8bit 的灰度级来表示的话,则可以表示大约 1670 万种颜色。但是,在实际中,所处理的图像同时出现的色彩只是其中的一部分。此外,将图像中非常相似的颜色归为同一种颜色时,也不会失去其自然的表达能力。

因此,可采用调色板方式来减少颜色数,实现**色彩压缩**(color compression),从而减少图像的存储数据量,使图像的描述更加有效。**色彩压缩**不是图像的生成方法,而是对用 CG 图像进行后处理的有效方法。

(3) 多值抖动色法 对自然图像进行色彩压缩时,如果对 R,G,B 的量化以少的位数表示的话,会出现在原图中原本没有的伪轮廓现象,导致图像的质量明显劣化。因此,为了减弱伪轮廓现象的影响,可采用多值抖动色法。

所谓的多值抖动色法是将经典的二值化方法扩展到色彩及多值化的方法。可利用误差方差法来实现。

(4) α 算法 用计算机制作蒙太奇照片过程中,进行图像合成时,将某个物体分割出来配置到另外一个物体上时,其拼接的部分会很明显,导致画面的效果劣化。 α 算法就是将这种在合成处理中的拼接痕迹减弱,使之在视觉上变得不明显的处理方法。也就是说,在表示像素的正方形区域中,如果存在两个图像,即背景图像和在其上叠加的物体图像,则可根据这两幅图像要素所占的面积比,将两幅图像要素的颜色进行混合的结果,作为合成图像像素的颜色,称这种混合比例

为 α 值。

(5) 图像数据的压缩技术 在图像数据的压缩技术的研究中, 高效编码方法的研究已进行了三十多年, 目前是一个越来越活跃的研究领域。特别是在最近一段时期, 在监视系统、电视电话、电视会议中, 适用于新的图像设备的编码方法的研究正在兴起。目前, 正在制定彩色图像压缩编码的国际标准, JPEG 这种在许多彩色图像处理中使用的压缩标准, 在计算机图形学领域中也将成为一种可被利用的标准。

1.3 三维计算机图形学的基础方法

本书的主题就是三维计算机图形学(CG), 在下面的章节中, 将对最新的三维计算机图形学方法进行讨论。本节将给出三维计算机图形学方法的概要说明。

★ 1. 三维计算机图形学方法

目前, 在计算机图形学领域中研究非常活跃的是三维计算机图形学, 其主要的研究方向如下所示:

- ① 立体对象的输入方式;
- ② 建模方法;
- ③ 造型方法;
- ④ CG 与 CAD 的应用(视频制作、CAD/CAM 系统等);
- ⑤ CG 的标准化。

在这些研究方向中, 立体对象的输入方式的研究是最难的研究方向。这是一个在今后的一段时间内, 需要与计算机视觉领域的研究者共同合作, 进行研究的领域。

另外, 建模和造型是三维计算机图形学的核心。甚至可以说

三维计算机图形学 = 建模 + 造型

即对于输入到计算机的数据进行三维立体建模, 是根据可视化处理的造型操作来实现的。

目前的 CG 和 CAD 在许多图像、视频相关的研究领域中被广泛有效地应用, 是其普及的关键, 从广义上讲, 是标准化的推行。

☆ 2. 建 模

计算机图形学方法中,以三维的立体对象为主,展开了多个方面的研究。利用计算机处理立体对象时,所使用的表示立体对象的模型称为立体模型,主要的模型有**线框架结构模型**(wire frame model)、**表面模型**(surface model)、**实体模型**(solid model)。此外,还有断层图像数据的重构,以及八叉树描述的分层表示模型等。

(1) **线框架结构模型** 这是一种将立体对象用轮廓线和小元素面描述的模型。这种模型的对象立体数据的输入方式简单,对特别复杂的立体模型也很容易操作。虽然用线表示的模型无法获得高品质的图像效果,但是,因为线框架结构模型可以实现描述的快速性,所以在表面模型的建模之前,常常被用作动态仿真实验。

(2) **表面模型** 这是一种用立体多边形描述对象的模型。在计算机中所存储的是表示单位立体多边形的顶点序列。对于复杂的物体也可以进行建模。

(3) **实体模型** 实体模型(CSG 描述:Constructive Solid Geometry Representation)是一种对长方体、球体、圆柱体等基本结构单位进行命名,通过对这些简单立体元素进行集合等运算,最终构成复杂的立体对象模型的方式。这种模型在机械领域的 CAD(计算机辅助设计)中常被使用。

以上,给出了三个具有代表性的模型,所有的模型都含有立体信息,三个模型之间可以进行相互转换。

☆ 3. 造 型

(1) **造型方法** 所谓的造型是将模型数据转换成我们可以观测的可视化形式的操作。目前已经有许多的方法被提出来,其中具有代表性的方法如下所示:

- ① 面消隐,线消隐方法;
- ② 明暗处理(描影法、平滑描影法);
- ③ 阴影生成处理;
- ④ 具有真实感的造型(纹理匹配法、光线跟踪法、辐射度算法);
- ⑤ (建模+造型)处理(分形、实体造型)。

20 世纪 60 年代初期,以线框架结构描述方法为主;20 世纪 70 年

代前期,迎来了明暗处理的鼎盛时期。1976 年根据纹理匹配方法的思想,使得具有真实感的高品质 CG 视频的制作成为可能。众所周知,进入 20 世纪 80 年代后,提出了许多新的造型方法。

(2) 面消隐,线消隐 在显示器上显示对象模型的时候,对于看不见的物体或者是物体的某个部分,原本看不到的面和线都需要消去。这种处理称为面消隐和线消隐(以下简称为面消隐),这是三维计算机图形学中不可缺少的处理。一般情况下,面消隐处理所需要的计算时间与构成多边形等立体元素的平方成正比,所以需要非常长的计算时间。因此,目前正在尝试着提高算法的运算速度。面消隐方法大致可以分为以下三类:

- ① 物体空间法(method in object space);
- ② 图像空间法(method in image space);
- ③ 排列优先法(method in list priority)。

这些方法是根据对由多面体构成一个物体,从某个视点来看,判断出哪个部分是可视的判断基准来进行分类的。物体空间法是在整个三维空间内判断其可视性的方法,图像空间法利用物体投影的投影面来进行可视判断的方法,排列优先法是对构成物体的多面体或者是构成多面体的多边形,根据从视点比较容易看到的优先顺序进行排列,将被排列优先顺序高的面所遮挡的面消去的方法。这种排列优先法中,最常被使用的是下面要给出的深度缓存(Z-buffer)法。

[深度缓存法]

所谓的深度缓存法是在从三维物体空间向二维图像空间投影时,进行面消隐的最简单的算法。在这个方法中,利用被称为 Z-buffer 的矩阵,对每个像素进行处理,实现面的消隐。这里,用 $\text{depth}[x, y]$ 表示深度缓存数据,用 $\text{intensity}[x, y]$ 表示图像的帧缓存数据,其算法如下:

① 对于画面上的全部像素, $\text{depth}[x, y]$ 的值用式(1.1)表示, $\text{intensity}[x, y]$ 的值用式(1.2)表示,背景的颜色 B 在初始化时设定;

$$\text{depth}[x, y] = \infty \quad (1.1)$$

$$\text{intensity}[x, y] = B \quad (1.2)$$

② 场景中的各个多边形向画面投影时,寻找多边形区域中所包含的所有像素 (x, y) ;

③ 计算每个像素 (x, y) 的深度 Z ;

④ 如果 $Z \leq \text{depth}[x, y]$, 那么包含这个像素 (x, y) 的多边形在之前处理过的多边形的内部, 表示最接近观测者。这时, 将 Z 代入 $\text{depth}[x, y]$, 将多边形的灰度值代入 $\text{intensity}[x, y]$ 。如果 $Z > \text{depth}[x, y]$, 则因为存在更接近观测者的多边形, 所以不作任何操作。

除此之外, 具有代表性的面消隐方法还有扫描线法。

1.4 本书的内容组织结构

本书从第2章开始, 以更高品质的造型方法为中心, 对目前三维计算机图形学领域中的主流方法进行介绍。

内容的安排结构如下:

第2章造型基础, 介绍基本的造型方法中的明暗处理, 以及纹理匹配等方法;

第3章造型法, 介绍提高CG造型能力的非常有效的算法, 对解决快速化方法中的问题点进行论述;

第4章体绘制方法, 对以生物体及各种三维物体的可视化技术而著称的实体造型法及其有效性进行论述;

第5章照明模型和辐射度法, 介绍通过对照明效果的描述模型, 实现具有真实感的三维物体的生成方法, 以及可以生成实际三维物体的辐射度算法;

第6章分形, 介绍以生成自然物体的CG图像为主的分形理论, 以及分形理论在计算机图形学中的应用实例;

第7章自然物体的生成方法, 介绍生成山岳、树木、白云、流水等各种自然物体的CG图像的算法;

第8章人类的计算机图形学描述与应用, 介绍在计算机图形学中非常重要的处理对象——人体模型的生成方法, 以及在虚拟主持人中的应用实例;

第9章计算机动画片的生成方法, 介绍用计算机图形学技术生成对象运动模式的方法;

第10章视频制作方法, 介绍三维计算机图形学中的一个具体的

典型应用,即电影及电视等商业影视媒体中的应用实例;

第 11 章三维计算机图形学硬件系统,介绍输入、输出系统以及三维图形系统的最新动向;

第 12 章计算机图形学的最新动向是对本书的总结,对今后的三维计算机图形学的研究动态进行具体的阐述。

以上,对在三维计算机图形学中利用的各种造型算法及其应用实例进行了简单的介绍。此外,本书中还给出了许多彩色照片,这是为了使读者加深对计算机图形学技术所生成的图像效果的理解。相信本书一定能为对计算机图形学感有兴趣和在该领域进行学习及研究的读者提供非常有用的参考信息。

在我们身边的电视新闻的片头中,以及商业广告的宣传中都可以看到用计算机图形学技术生成的图像。这些都是有着颜色深浅效果,非常漂亮的图像。最初,造型方法是工业设计领域中所使用的展示设计效果的虚拟图。这种虚拟图的描述方法,即在计算机图形学技术中的灰度图像的生成方法,称为**造型方法**。为了使造型方法可以更加准确地描述对象,需要进行以下几个环节的操作:①投影图的描述,②为了更好地表示形状而生成的明暗效果,③表示材料以及表面图案。

本章就计算机图形学发展初期所提出的,目前仍在广泛使用的三维对象形状造型方法中的投影法、描影法、纹理匹配法等进行介绍。

2.1 投影法

图 2.1 所示是在计算机中,从对三维立体对象数据进行构造,到在显示器画面上表示所生成对象的流程,以及各处理环节中所需要的输入数据。在这个生成 CG 图像的流程中,将立体图形变换成二维图形的方法称为**投影法**。本节将对该投影法进行讨论。

首先,如图 2.2 所示,在某个空间中,设定一个平面作为投影面。接下来,设定一个不在空间投影面上的一个点,称这个点为**视点**或者**投影中心**。视点与空间上某个点的连线称为**视线**。求视线与投影面交点的操作称为**点投影**。如果对三维图形上的每个点都进行点投影

的话,则称为三维图形的投影。视线集中在视点上的投影称为**透视投影**或者是**中心投影**。视线是相互平行的投影称为**平行投影**。由投影法获得的三维图形的投影,在画面上描述成一个图,称之为**投影图**。

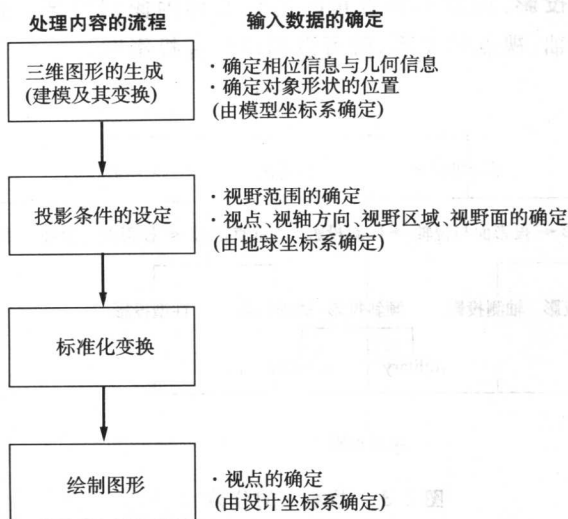


图 2.1 三维图形的生成、显示流程图

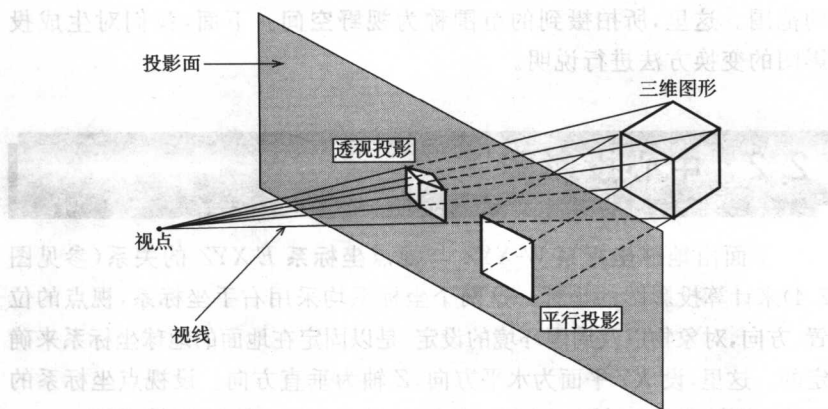


图 2.2 平行投影与透视投影

将按照这种方法所获得的投影图进行分类,如图 2.3 所示,根据表示视点与投影面距离的视距离的不同,可以大致分为两类。视点是

有限距离时的投影称为透视投影或者中心投影,视点在无限远处时的投影称为平行投影。进一步地,如果根据表示观测方向的视轴与投影面所成角度的不同,对投影法进行分类的话,则这个角度为直角时的投影称为垂直投影,角度不为直角时的投影称为倾斜投影。这样,根据投影面与视轴、视点的关系,就可以制作各种投影图。

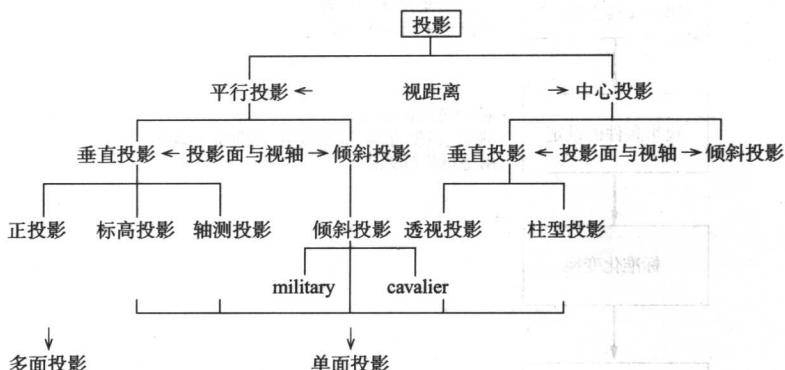


图 2.3 投影法的分类

以拍摄照片为例,对生成投影图的投影变换进行说明。选定镜头、拍摄场地(视点)、照相机的朝向(视轴)之后,也就确定了拍摄场景的范围。这里,所拍摄到的范围称为视野空间。下面,我们对生成投影图的变换方法进行说明。

2.2 中心投影图

下面由地球坐标系 $W\text{-}XYZ$ 与视点坐标系 $E\text{-}XYZ$ 的关系(参见图 2.4)来计算投影图的坐标。这两个坐标系均采用右手坐标系,视点的位置、方向,对象物以及周围环境的设定,是以固定在地面的地球坐标系来确定的。这里,设 XY 平面为水平方向, Z 轴为垂直方向。设视点坐标系的 Z 轴与视轴平行, Y 轴与画面坐标系($O\text{-}UVN$ 坐标系)的 U 轴平行。

在地球坐标系中定义空间上任意一点 P ,其坐标值设为 (x, y, z) 。设视点坐标为 (x_e, y_e, z_e) ,方位角为 α ,仰角为 β ,点 P' 在视点坐标系中表示为 $P' = (x_1, y_1, z_1)$,两者之间存在如下的关系式。这里,方位角

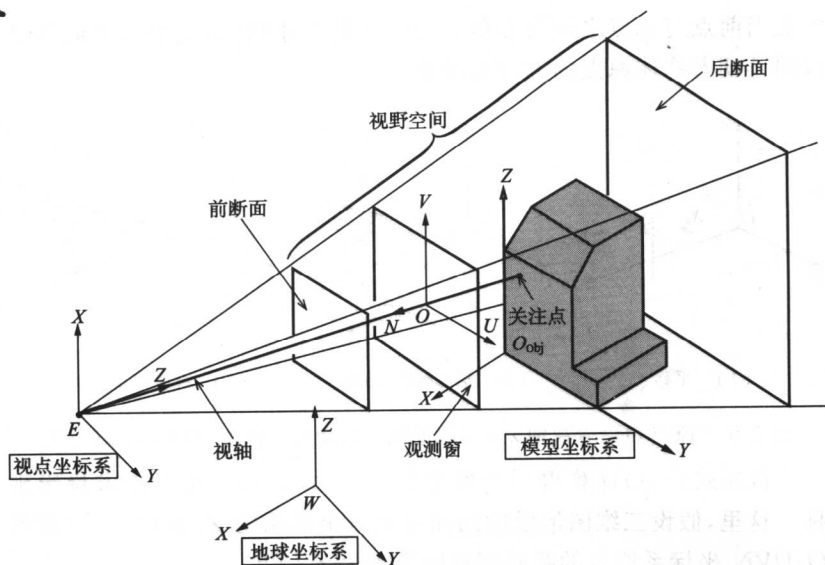


图 2.4 投影变换的四个坐标系

是指沿着 Z 轴的旋转角,仰角是指沿着 Y 轴的旋转角。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = T_\beta \cdot T_\alpha \begin{pmatrix} x - x_e \\ y - y_e \\ z - z_e \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

这里

$$T_\alpha = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$T_\beta = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

式(2.1)是以视点坐标系 E -XYZ 为原点,对对象图形进行透视变换的公式。总结上面的操作,如图 2.5 所示,实际上是进行了以下几步操作:① 视点坐标系的原点平移到视点坐标原点 E 上;② 沿着视点坐标系的 Z 轴旋转,旋转角度为方位角 α ;③ 沿着 Y 轴旋转,旋转角度为仰角 β 。在这个变换方法中,必须计算视轴的方向朝着物体时,物

体上当前点与视点之间的夹角。如果只是描述物体,则视轴方向可以按照其朝着物体原点的方向来计算。

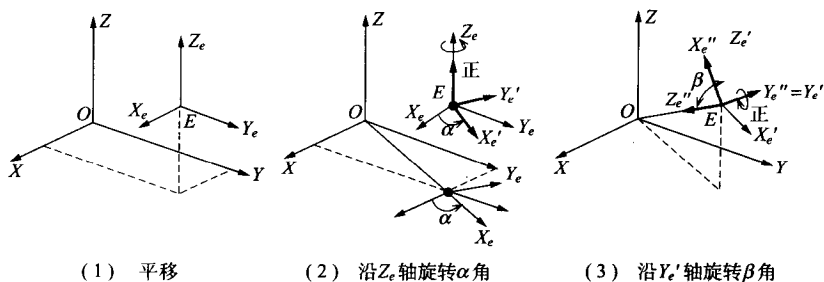


图 2.5 原点 O 沿着视轴 z 方向时的视点移动与方位角、仰角的旋转方法

按照式(2.1)计算得到变换坐标 (x_1, y_1, z_1) 后,接下来求投影坐标。这里,假设三维图形投影画面与视点坐标系的 Z_e 轴垂直,视点到 O -UVN 坐标系原点的距离即视距离设为 f 。

如图 2.6 所示,空间上的点 P 在视平面(投影面)上的点 $P''(u, v)$ 可由下式求得:

$$\begin{aligned} u &= f * (y_1 / z_1) \\ v &= f * (x_1 / z_1) \end{aligned} \quad (2.4)$$

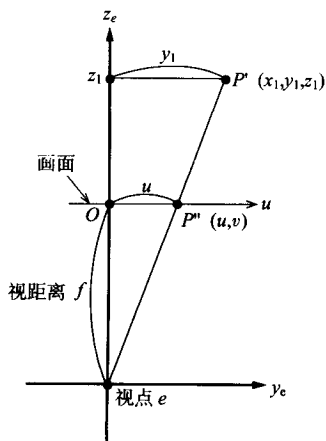


图 2.6 投影坐标的求解方法

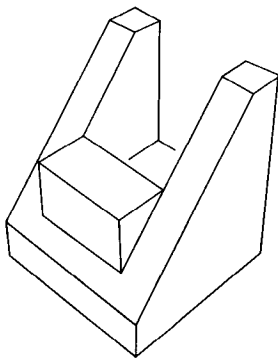


图 2.7 透视图示例

用此公式计算获得的一个图形示例如图 2.7 所示。在下节中,我们将讨论根据投影法进行明暗计算的方法。

2.3 描影法

在某个光源下观察三维物体,图形表面的亮度分布不是恒定的,而是有着不同亮暗分布的。根据一个已知的光源,可以知道所观察物体的形状、材质和颜色。

如彩图 2.1 所示,当从倾斜方向打光源时,球和圆锥正对着光的地方比较亮,背对着光的地方则比较暗。正对着光的地方,从面的朝向与光源的关系,可以获知亮度的变化。同样,由光与物体表面的朝向关系所形成的物体上的亮暗,称作**明暗分布**(shade)。物体遮住光后,光照不到的暗的地方称作**阴影**(shadow)。在计算机图形学中,根据光源与三维图形表面法线的关系,求得表面亮度的方法称为**明暗生成法**(shading)。利用这个方法所描述的物体,因为光的强弱、角度、反射等不同,获得的物体表面的亮度也不同,由此便可形成立体感。这种阴影的表示方法称为**阴影生成法**(shadowing)。两者结合,称为**描影法**,在术语上,也常用 shading。

描影法与照在物体上的光的性质及物体表面的性质相关。光源可以分为自然光源和人工光源,这些光源又可分为直射光、环境光、反射光、透射光等。物体表面的性质则包括材质、颜色、透明度、反射、透射率、折射率等。根据这些性质,对物体进行正确描述的建模方法,使得物体的写实性描述成为可能。

2.4 描影法模型

光源在现实中有形状和大小,而在计算机图形学中则是模型化的。光源模型分为平行光线、点光源、线光源、面光源、多面体光源等。根据应用目的的不同,采用不同的光源模型。光源照射到物体上发生反射之后,反射光线射入到观测者的眼中就可以看到物体。这种光分

为周围环境中的泛光、漫反射光、镜面反射光、透射光等,根据这些光的照射强度的计算,可以确定物体表面的亮度。

物体表面的亮度随着物体表面的朝向、视点的位置、光源的空间位置关系的不同而变化。反射率不同的物体在相同光源等条件下,其表面的亮度分布也是不相同的。例如金属物体的亮暗分布范围比较宽,高光区有一部分亮度非常强。但是对于彩图 2.1 所示的这种用石膏做的物体,出现的强高光区的部分就比较少。这种亮暗分布不仅与形状有关,而且与物体的材质有关。

由物体表面的朝向、视点的位置、材质确定表面上的一点的亮度的模型称为**描影法模型**。当光源是平行光线时,可用下式来计算:

$$L = L_d + L_r + L_c \quad (2.5)$$

式中, L 为物体上某一点 P 的亮度, L_d 为无限远处光源的入射光的漫反射亮度, L_r 为入射光的直反射亮度, L_c 为周围环境的泛光亮度。这些值均可由下面的方法给出。

(1) 入射光的漫反射亮度 根据余弦定理可知,物体表面的入射光的强度与入射角的余弦成正比。这时,也与光的强度成正比(参见图 2.8)。当某个无限远处的光源以强度 L_{in} 入射到 P 点时,点 P 的亮度 L_{pi} 根据点 P 上的物体表面的法线 N 及角度 θ_i ,由下式给出:

$$L_{pi} = L_{in} \cos \theta_i \quad (2.6)$$

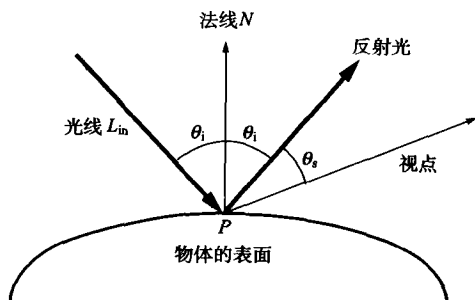


图 2.8 漫反射

如果点 P 所在平面上的法线是光源的方向的话,则表示最大亮度。随着与光源角度的增大,亮度逐渐降低。

当以强度为 $L_{in} \cos \theta_i$ 的光入射在点 P 上时,对象物的材质不同,

其反射的强度也不同。因此,如果将立体对象物的漫反射系数设为 R_d 的话,则入射光的漫反射亮度 L_d 可由下式给出:

$$L_d = R_d L_{in} \cos \theta_i \quad (\text{其中}, \theta < 90^\circ, 0 < R_d < 1) \quad (2.7)$$

式中, $\cos \theta_i$ 为 N 与 L_{in} 的内积(L 是光线方向上的单位向量)。这时, θ_i 限定在 90° 以内,对于大于 90° 的情况, $L_d = 0$ 。

(2) 入射光的正反射亮度(镜面反射) 当物体表面为金属或者是镜面时,光源照射在物体上的光的反射很强(参见图 2.9)。设视线与反射光的夹角为 γ ,则正反射光亮度可由下式给出:

$$L_r = L_{in} w(\theta_i) \cos^n(\gamma) \quad (2.8)$$

式中,镜面反射率 $w(\theta_i)$ 是入射角 θ_i 的函数。材质不同,其反射率也不同。一般在不需要精确表示的时候,设 $w(\theta_i)$ 是与入射角 θ_i 无关的常数。 $\cos \gamma$ 可由反射光与视点角度为 γ 的内积求得。指数 n 是表示光泽性的值,一般在 1 到 10 的范围内取值。对金属这种存在局部高光区的情况, n 取比较大的值。

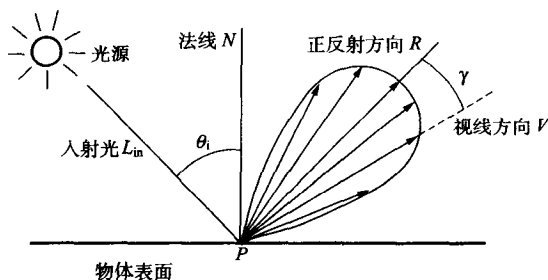


图 2.9 镜面反射

(3) 周围环境的泛光 当光线与面的夹角大于 90° 时,光照不到的地方会变得完全黑暗。但是,实际上观察到的情况是,即使是光照不到的地方,因为受周围面的二次反射光的作用,多少会有一些光亮。同样,若面上几乎所有地方都是相同的亮度,则即使是光照不到的地方也不会完全黑暗。

设周围环境的强度为 L_a ,面的反射率为 R_d 时,泛光为 $L_c = L_a L_d$ 。在省略的情况下,这个亮度值的大小约是以上三个亮度值总和的 $1/10$ 。

按照上面的方法,可以计算物体表面上某一点的亮度值。下面,

我们讨论当物体是透明体时的处理。

(4) 透射光的亮度 在看玻璃等透明物体时,在视点上可以看到玻璃内部的光。设点 P 上的透过面的光强度为 L_1 ,其后侧面上的光强度为 L_2 ,则整体的光强度 L 可由下式计算得出:

$$L = tL_2 + (1-t)L_1 \quad (2.9)$$

式中, $t(0 \leq t \leq 1)$ 是给定的透光率。

这是一个非常简单的计算公式。通常,与视线垂直部分的透光率比较高,与视线接近平行部分的透光率比较低。将其建模的话,有

$$t = t_0 - (t_0 - t_1)(1 - \cos\phi)^{t_p} \quad (2.10)$$

式中, t_0 为 $\phi=0$ 时的透光率, t_1 为 $\phi=90$ 时的透光率, t_p 为透明度增强参数, ϕ 为视线方向与面的法线向量的夹角。

利用以上四个计算公式表示多面体时,求出各个面上一点的亮度之后,在投影面上相应的位置上填入相同的值,来表现亮暗分布效果。这种方法称为常量描影法(constant shading)。但是,为了表示曲面,需要用连续的亮暗分布来表示。为此,我们采用下面将要介绍的方法,即用平滑的亮暗变化来描述用多面体近似的曲面,这种方法称为平滑描影法(smooth shading)。

2.5 平滑描影法

平滑描影法包括如下几个步骤:① 计算用三角形分割后的多面体的各个顶点的亮度及法线;② 在面内,对前面计算得到的亮度值,进行插值运算来描述曲面上像素点的亮度值,并求出法线;③ 根据求出的亮度值和法线,在面内进行插值计算,就可得到平滑变化的亮暗分布。

★ 1. 高洛德(Gouraud)描影法

当用三角形分割多面体时,其三个顶点的亮度如图 2.10 所示,设为 L_1, L_2, L_3 ,三个顶点的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$,将这三个顶点的亮度值进行线性插值,得到三角形中每个像素点的亮度值的方法称为 Gouraud 描影法(Gouraud shading)。

① 求构成一个顶点的各个面上的法线。

② 求顶点上各法线的平均值,根据该平均值与光线的角度,用式(2.1)计算顶点亮度值 L_1 。同理,求出三角形另外两个顶点的亮度值 L_2 和 L_3 。

③ 在实际描述中,每个扫描线上都要进行这样的操作。因此,先求一根扫描线与三角形的交点 $(x_a, y_s), (x_b, y_s)$,由交点的亮度值计算扫描线上各个像素的亮度值。交点的亮度根据扫描线两侧的两个顶点亮度的线性插值得。

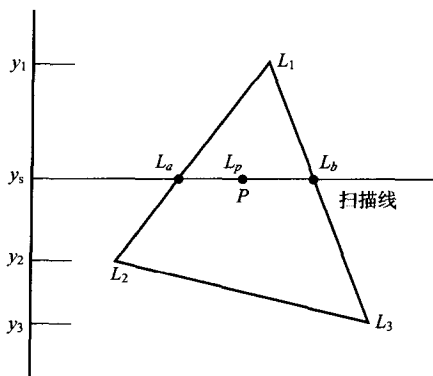


图 2.10 Gouraud 描影法

$$L_a = L_1 \frac{y_s - y_2}{y_1 - y_2} + L_2 \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_2}$$

$$L_b = L_1 \frac{y_s - y_3}{y_1 - y_3} + L_2 \frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_3} \quad (2.11)$$

④ 扫描线上的点 P 的亮度 L_p 由下式求出:

$$L_p = L_a \frac{x_b - x_p}{x_b - x_a} + L_b \frac{x_p - x_a}{x_b - x_a} \quad (2.12)$$

经过以上四步计算,可以获得三角形内部所有像素,并使平滑的亮暗分布效果的实现成为可能。Gouraud 描影法的计算简单,所以在许多图形工作站上都备有专用的硬件来实现该算法。因此,现在只要执行一条简单的指令,就可得到 Gouraud 描影法的计算效果。

★ 2. 冯式(Phong)描影法

Gouraud 描影法无法对面之间连接部分的亮暗变化进行正确的表示,而 Phong 描影法(Phong shading)则可以克服这个缺点。该方

法是先求各个顶点的法线方向上的内插扫描线上各个像素的法线,然后求其点的亮度值(参见图 2.11)。

① 用三个顶点的法线 v_1, v_2, v_3 , 求与扫描线的交点 v_a, v_b 的法线方向上的线性插值;

② 求扫描线上点法线的线性插值;

③ 在各点上, 分别用求出的法线计算亮度值。

彩图 2.2 是平面造型及 Gouraud 造型的示例。彩图 2.3 是令式 (2.8) 中的 n 为 1 和 5 时所表示的自由曲面的示例。表面反射的不同, 可以表现物体材质的不同。

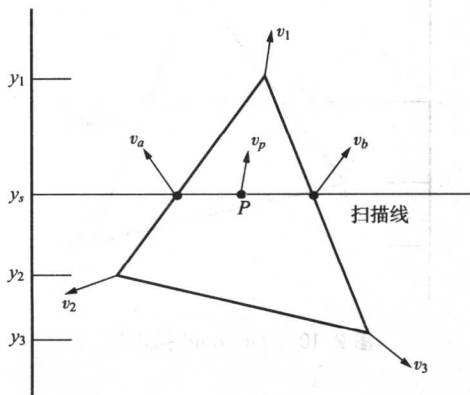


图 2.11 Phong 描影法

2.6 纹理匹配法

★ 1. 匹配法的基础

三维图形的描述可以用前面介绍的造型方法来实现。进一步, 为了使表现效果更加逼真, 就需要在图形的表面进行纹理的描述。这里, 所谓的纹理是指物体表面细小的凹凸, 或者是物体表面的图案。这种在图形表面贴上图案或是细小凹凸的操作称作匹配法。

这种将立体物与表面图像分开处理的方式, 使得具有真实感的立体图形的描述成为可能。这种表面图像的生成方法可以分为如下三类:

- ① 用计算机图形学的方法,重复生成某个图案;
 - ② 将自然物体等照片,通过图像输入装置将其数字化,之后以二维图像的形式存储。
 - ③ 根据物体表面法线方向的变化,来模拟生成物体表面细微的凹凸。
- ①和②是将二维图像贴到三维物体上的方法,是匹配法的基础。
③是将物体表面的凹凸以物体的三维数据进行描述的方法,称之为**碰撞匹配法**(bump mapping)。

☆ 2. 纹理匹配法

设表示物体的坐标系为 xyz , 物体表面的图案图像的坐标系为 uv 时,求投影到物体上点 P 的图案图像点 $Q(u, v)$, 将点 Q 上的颜色赋给点 P 即可。这样,将所有画面上的像素都进行这种操作,就可将图案贴到物体的表面。如图 2.12 所示,表示图案的二维坐标系与物体表面的坐标系建立了映射关系。

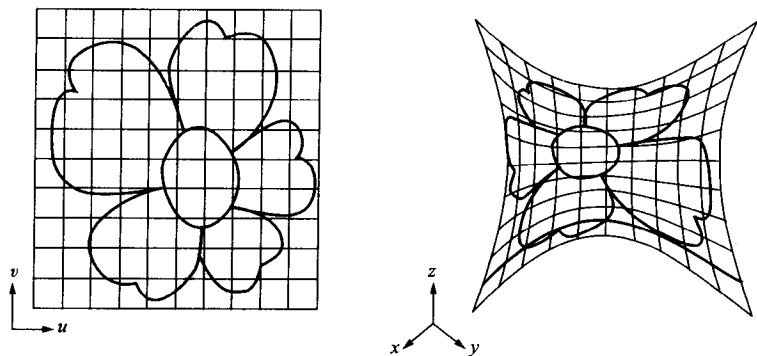


图 2.12 匹配法中的变换

彩图 2.4 是一个平面图案及其在正方体上的纹理匹配示例。彩图 2.5 是将图案匹配到领带上的示例,领带的形状是一个由多面体近似的曲面。

☆ 3. 碰撞匹配

水果,还有动物皮肤表面都有很细小的凹凸,这些凹凸部分的高光区的位置与光源、视线有关,存在着非常细微的变化。我们希望将

这种表面的凹凸用立体模型建模,使其发生细小的变化。这种表面凹凸的立体模型,是将表面分割成很细小的块之后,得到形状数据。该方法非常麻烦,在只是为了达到表现目的场合,其中所获得的某些信息完全没有必要。要得到物体形状,获得外形是关键,使表面具有细微凹凸效果的方法称为碰撞匹配,其处理方法如图 2.13 所示。

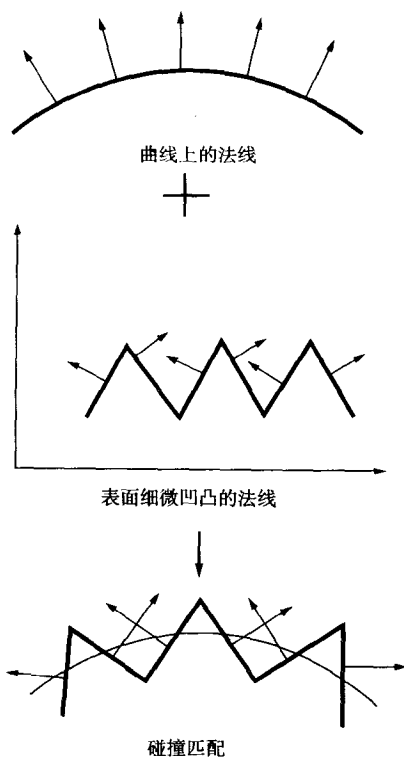


图 2.13 碰撞匹配

- ① 具有凹凸的图形,可以分为大体上是平滑表面的图形和其上的凹凸成分;
- ② 求出凹凸成分的法线;
- ③ 将此法线在表示图形的表面进行匹配;
- ④ 用匹配得到的法线计算明暗分布。

经过这样的计算,即使是复杂形状的物体,用少量的数据,也可以

获得具有逼真效果的描述。

彩图 2.6 是台灯的造型示例。这个台灯的支柱的基本形状比较简单,存在一定的细小凹凸。将这个图形用三维模型来表示时,只是增加了数据量。这里,我们采用碰撞匹配的方法,图形数据不是很复杂,而且还可以表现出凹凸效果。

本章从最先进的计算机图形学方法入手,对基础的造型方法中的投影法、明暗生成法、描影法,以及表示材质的纹理匹配法进行了介绍。其中一些在一般的图形描述中广泛使用的方法,已经用硬件实现了。但是,要实现三维立体图形的更好画质的表示,用在本章中介绍的方法进行插值处理计算出的亮度值,还不能说是可以正确地表示一个真正的图形。要获得更加逼真的效果,需要建立对形状的评价方法、更加精确的形状表示方法,以及有助于人理解的各种描述方法。

对需要深入研究造型方法的读者,如下所示,提供了有助于理解本章内容的参考文献。

参考文献

- [1] 安居院, 中嶋: コンピュータグラフィックス, 昭晃堂 (1992)
- [2] 中前: コンピュータグラフィックス, オーム社 (1987)
- [3] 町田: コンピュータイメージング, コロナ社 (1984)
- [4] 川合: 基礎グラフィックス, 昭晃堂 (1985)
- [5] 水上: コンピュータグラフィックス, 朝倉書店 (1991)
- [6] 千葉 ほか: コンピュータアルゴリズム全科, 啓学出版 (1991)
- [7] 中前, 西田: 3次元コンピュータグラフィックス, 昭晃堂 (1986)
- [8] 近藤, 田嶋: モダングラフィックス, コロナ社 (1982)

第 3 章

造 型 法

造型法是用来生成表示实际物体图像的方法,其中具有代表性的光线跟踪法的应用最为广泛^[1,2]。这种方法可以很容易地对反射、折射等光学现象进行仿真,是一种非常简单的方 法。但是其计算量非常大,也就是说,“慢”是它的最大弱点。本章在介绍造型算法的同时,对提高造型效率的方法进行讨论,并对其效果进行考察。

3.1 造型的原理

当对观察对象的立体物进行造型时,从某个视点所能看到的这个对象的状况,需要通过计算来获得。因为图像是由像素排列而成的,所以所谓的图像生成就是确定视点在朝着各个像素的方向上能看到的东 西,之后对各个像素进行着色的处理过程。

在前一章我们已经介绍过,造型有多种方法,本章将要介绍的主要造型方法是,在用户坐标系(定义物体形状的三维坐标系)中,设定视点与投影图,沿着投影图上各个像素朝着视点的方向,跟踪进入视点的光线,求出亮度和颜色的方法(参见图 3.1)。实现造型的程序基本结构,如图 3.2 所示。可以按照任何的顺序来处理像素,是这种方法的特点。在光线的跟踪过程中,最先遇到的物体就是可看见的像素的方向。因此,需要计算光线与物体的交点,当碰到的物体发生镜面反射或者折射时,对反射光或者折射光进行跟踪,可以在图像中表现出反射或折射的效果。

3.1 造型的原理

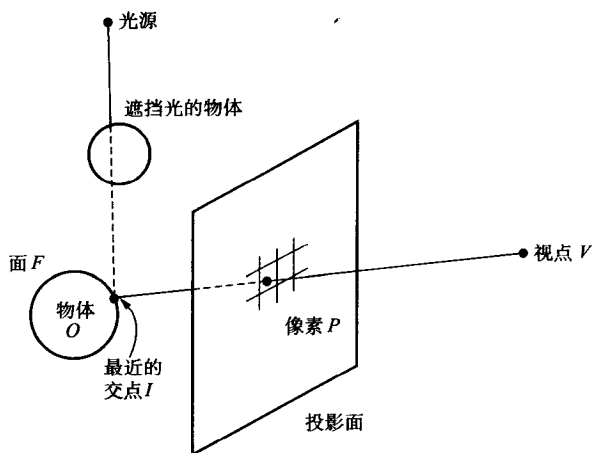


图 3.1 造型原理示意图

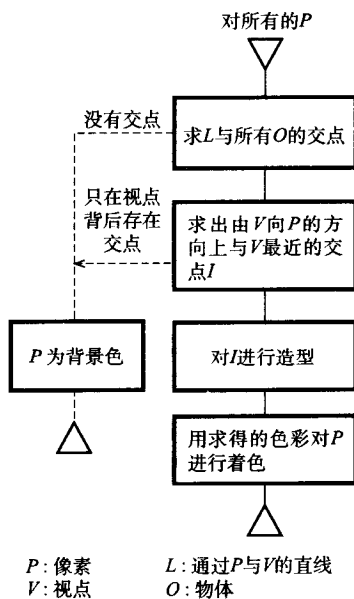


图 3.2 实现造型的程序结构流程

当碰到发生折射物体的时候,同时跟踪反射光和折射光,并对其
进行综合,将所获得的结果对当前像素进行着色处理。因此,即使是

计算一个像素,如图 3.3 所示,也需要根据一个树状结构对光进行跟踪。在跟踪树上,每前进一个分枝,都必须计算光线与物体的交点。这个跟踪树原本是无限深,无限宽的,但是因为如果这样的话,计算时间也需要无限长,所以一般都是跟踪到适当的地方终止。跟踪的终止条件如下。

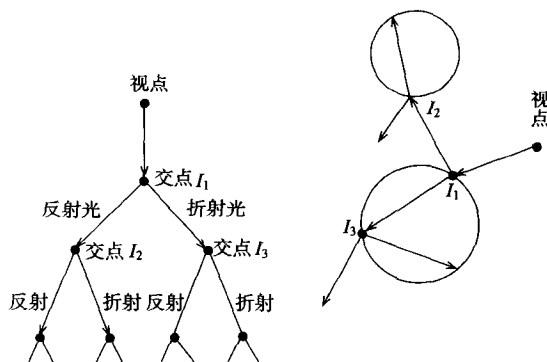


图 3.3 光跟踪的树状结构示意图

[处理终止条件]

① 反射光碰到已经发生漫射的面时,因为无法跟踪之后的光线,所以用朗伯描影法(Lambert shading)可以确定光的强度;

② 光线直到无限远处都碰不到物体时,用背景色来确定光的强度和颜色;

③ 在跟踪的路径上,所包含的反射或者折射的次数超过一定的限度时,即跟踪树到了很深的程度,因为反射或者透过透明物体中的透射光线有衰减,所以需要测试反射、折射的次数及衰减的程度,最终在判断出的对图像影响最小的地方停止跟踪。

当跟踪的光线碰到某点所在的面时,这点在视点的位置上就是可以看见的点。对于这个可以看见的,并且是已知的点,检测在光源与这点的连接线段上是否还有其他的物体,如果没有,则这点是光照射到的点,如果有其他物体存在的话,这点就是进入到阴影中的点(参见图 3.1)。当然,这时也需要计算光线与物体的交点。

对每个像素点都进行这样的光线跟踪操作就是造型。由造型生成的一个典型的图像示例如彩图 3.1 所示。

在阴影的计算中,如果与光源的交点的连接线段上的物体是透明的,则计算会稍稍复杂一些。如果光源射出的光在这个物体上发生折射,则交点上能够有多少光照射是不知道的,这是造型法的一个局限,本章所介绍的简单的造型法无法解决这个问题。

3.2 光的作用

造型的原理在 3.1 节中已经进行了介绍。这里,对彩图 3.1 所示的用造型法获得图像所使用的计算公式及法则进行说明。

★ 1. 光线与物体的交点

设视点为 $V=[V_x, V_y, V_z]$, 像素的中心为 $P=[P_x, P_y, P_z]$, 通过这两点的直线, 对于参数 t 有:

$$\begin{cases} x(t) = V_x + (P_x - V_x)t \\ y(t) = V_y + (P_y - V_y)t \\ z(t) = V_z + (P_z - V_z)t \end{cases} \quad (3.1)$$

在视点位置上 $t=0$, 像素中心位置上 $t=1$ 。物体 O 的表面用 $F(x, y, z)=0$ 来定义时, 求直线(3.1)与 F 的交点 I , 将直线表达式中的 $x(t), y(t), z(t)$ 代入 $F(x, y, z)$ 中的 x, y, z , 求解关于参数 t 的方程解 t^* , 即可得到交点 $I=[x(t^*), y(t^*), z(t^*)]$ 。如果这样的实数解不存在的话, 则交点不存在。在实际中, 因为所求的是与视点最近的交点, 所以只要先求出满足直线方程的所有的与物体所有表面的交点之后, 从中找到 t 值(大于 0 的)为最小的解即可。

◆ 例 1

平面 $ax+by+cz+d=0$ 与这条直线的交点的参数 t^* 为

$$t^* = \frac{-(aV_x + bV_y + cV_z + d)}{a(P_x - V_x) + b(P_y - V_y) + c(P_z - V_z)} \quad (3.2)$$

当直线与平面平行时, 式(3.2)的分母为 0。

◆ 例 2

二次曲面 $ax^2+by^2+cz^2+dxy+eyz+fzx+gx+hy+iz+j=0$ 与这条直线的交点的参数 t^* 是二次方程 $At^2+Bt+C=0$ 的实数解。其中

$$\begin{aligned}
A &= a(P_x - V_x)^2 + b(P_y - V_y)^2 + c(P_z - V_z)^2 \\
&\quad + d(P_x - V_x)(P_y - V_y) + e(P_y - V_y)(P_z - V_z) \\
&\quad + f(P_z - V_z)(P_x - V_x) \\
B &= 2[aV_x(P_x - V_x) + bV_y(P_y - V_y) + cV_z(P_z - V_z)] \\
&\quad + d[V_x(P_y - V_y) + V_y(P_x - V_x)] \\
&\quad + e[V_y(P_z - V_z) + V_z(P_y - V_y)] \\
&\quad + f[V_z(P_x - V_x) + V_x(P_z - V_z)] \\
&\quad + g(P_x - V_x) + h(P_y - V_y) + i(P_z - V_z) \\
C &= aV_x^2 + bV_y^2 + cV_z^2 + dV_xV_y + eV_yV_z + fV_zV_x \\
&\quad + gV_x + hV_y + iV_z + j
\end{aligned} \tag{3.3}$$

当判别式 $D = B^2 - 4AC$ 大于 0 时, 有两个交点; 当 $D = 0$ 时, 有一个交点; 当 $D < 0$ 时, 没有交点。

特别地, 对于球心为 $[C_x, C_y, C_z]$, 半径为 r 的球面, 有

$$\begin{aligned}
A &= (P_x - V_x)^2 + (P_y - V_y)^2 + (P_z - V_z)^2 \\
B &= 2[(P_x - V_x)(V_x - C_x) + (P_y - V_y)(V_y - C_y) \\
&\quad + (P_z - V_z)(V_z - C_z)] \\
C &= (V_x - C_x)^2 + (V_y - C_y)^2 + (V_z - C_z)^2 - r^2
\end{aligned} \tag{3.4}$$

◆ 例 3

当用 $F(u, v) = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]$ ($0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$) 表示曲面元素时, 用平面或者是二次曲面这种简单的方法无法求出交点。在目前正在研究中的方法中, 包括以下几个环节:

① 利用后面将要介绍的包围体 (bounding volume) 方法, 即将所有的曲面元素用球体或者是盒体包围, 判别光线与这个包围物体的交点是否存在。如果光线与包围体不存在交点, 则与原来的曲面元素间也不存在交点。如果找到光线与包围体的交点, 则将曲面元素继续细分之后进行同样的操作, 接着找出限定交点存在的范围。

② 用数值计算方法求解曲面元素的表达式与直线表达式之间的联立方程组的解。

★ 2. 反射与折射

按照上面所介绍的方法选择的交点, 可以跟踪镜面反射表面的反射光。设反射光的方向为 R , 从视点 V 到交点 I 方向上的单位向量设

为 $E=[E_x, E_y, E_z]$, 交点 I 与面的外侧单位法线向量设为 $N=[N_x, N_y, N_z]$, 则放射光方向 R 为:

$$R=2(-E \cdot N)N+E \quad (3.5)$$

式中, $E \cdot N$ 表示向量的内积, 即表示 $E_x N_x + E_y N_y + E_z N_z$ (参见图 3.4)。

在交点为 I 的物体 O 是透明的情况下, 还必须跟踪折射光。设视点所在空间的折射率为 n_1 , 物体 O 的折射率为 n_2 (视点在空中时, $n_1=1$), 入射光射向物体表面 F 的入射角为 θ_1 , 折射光从 F 射出的折射角为 θ_2 , 则 θ_1 和 θ_2 之间存在下面的关系 (参见图 3.5), 这个关系式称为 **Snell 法则**。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

(水的折射率为 1.33, 玻璃的折射率为 1.5~1.9, 钻石的折射率为 2.4)

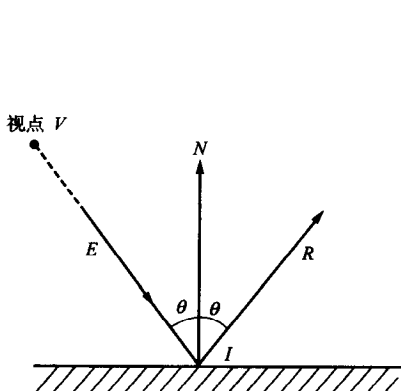


图 3.4 反射光的方向

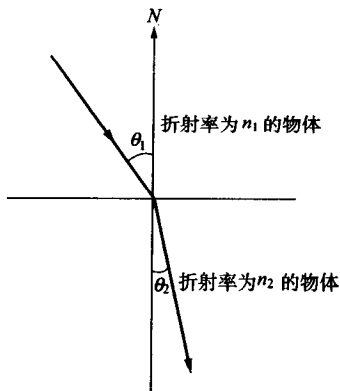


图 3.5 折射光的方向

对于已知的可以看见的点, 看见的光的亮度, 用前面所介绍的描影法的模型来计算, 是漫射的反射光与环境的泛光、镜面的反射光、折射光的和。透明物体表面的入射光中, 若将不发生折射的反射光部分的比例设为 k , 则有

$$k = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (3.7)$$

这个计算公式称为**菲涅尔 (Fresnel) 公式**。

☆ 3. 抗混叠处理

在进行造型处理时, 原本连续的光线中, 只有通过像素中心的那

部分才作为观察对象来生成图像。为此,所得到的图像会存在如下的不自然的现象:

① 物体的轮廓上会出现毛刺。称这些毛刺为粗糙(shaggy)。

② 在画面上,比较细的物体会时不时地断开,无法正确表示。对比较小的物体则无法表示出来。

这些现象称作**混叠**。减弱混叠的处理称作**抗混叠**。造型过程中的抗混叠有以下几类方法:

① 重采样技术。在一个像素范围内,对不同位置上的光线进行跟踪,取其平均值作为该像素的颜色值。一种方法是,设在一个像素上所照到的光线的根数为一个定值;另一种方法是,如果观察到的若干根光线的颜色变化很大的话,就增加光线根数。

② 给出光线的粗细。具体在 3.3 节的第 3 项中做详细介绍。

3.3 造型的快速化方法

我们知道,造型处理时,需要比较长的计算时间的环节是,求由直线表示的光线与物体的交点。在简单的执行过程中,当对象比较复杂时,这部分的计算时间甚至占到总计算时间 95% 以上^[3]。这个计算时间与对象中的物体个数以及形状的复杂度成正比。因此,为了使求解交点的计算快速化,已经提出了许多方法。快速化方法大致可以分为两类,一类是软件方法,即通过算法的设计来提高计算速度;另一类是硬件类方法,即通过并行处理计算机来实现计算速度的提高。

通过算法的改良提高计算交点速度的方法主要有以下三个思路:

- ① 减小光线与环境交点计算的平均代价;
- ② 限定作为交点计算对象的物体;
- ③ 光线特征的一般化处理。

★ 1. 平均代价的削减方法

当物体的形状比较复杂的时候,判断物体与光线是否相交需要花费相当的时间代价。因此,将物体用具有简单形状的包围体(BV: Bounding Volume)包围起来,首先判断 BV 与光线是否相交。如果 BV 不与光线相交,则其内部的物体也与光线不相交。当光线与 BV

相交时,进一步地还需要判断物体与光线是否真正相交。

在这种方法中,计算交点的次数显然增加了,但是却可以降低平均的计算代价。如果 BV 与实际物体相比,体积大很多,则效率低。此外,在确定 BV 时,如果所选择的 BV 在形状的确定,以及与光线的交点的计算等操作中需要花费较大的时间代价的话,则这种形状的 BV 是不合适的。因此,通常采用的是与坐标轴对称的长方体形的箱体或者是球体。与物体的形状相对应,可以分成几个不同形状的 BV 来包围。

根据不同的情况,一个对象可以由一个 BV 包围,也可以将对象中的物体进行组合,对组合成一体中的物体,用一个 BV 来包围。之后,再用一个大的 BV 将组合中的所有小的 BV 包围起来。当这种大的 BV 与光线相交时,进一步判断光线与组合中的每个小的 BV 是否存在交点。构造了具有分层结构的 BV 后,就可以将原来的问题看成是计算 n 个物体与光线的交点问题,其计算量大约为 $O(\log n)$ 。这是因为对于 n 个节点完全平衡的二叉树的深度为 $O(\log n)$ 。

在构造分层结构时,需要确定哪些物体被归为同一个组合。如果物体的个数不是很少,则要分析所有可能的组合是不可能的。而且,即使是分析所有可能的组合,也需要花费时间代价,这样就失去了快速化的意义。因此,可以通过人机对话的形式完成组合的划分,但这却是非常麻烦的事。除此之外,可以根据空间中物体的分布情况来实现自动的分层构造^[4,5]。还可以利用对物体进行建模时的信息进行构造^[6]。

〈实验 1〉在投影面上,考虑相互连接的相同尺寸的球所排列成的网格状(参见图 3.6)。用与坐标轴平行的正方体形的 BV 将这些球包围起来,接下来,对每两个正方体用一个长方体包围起来,之后,每两个长方体再用一个长方体包围起来,由此构成一个二叉树。对于这个二叉树,各长方体以尽可能小的尺寸为构造准则。

设对象中所包含的球的个数是一个变量,我们来比较不用 BV 时交点的计算次数,以及使用 BV 时交点的计算次数的不同,其比较结果如图 3.7 所示。这里,投影面上的像素数为 300×300 ,对反射和折射不进行跟踪。

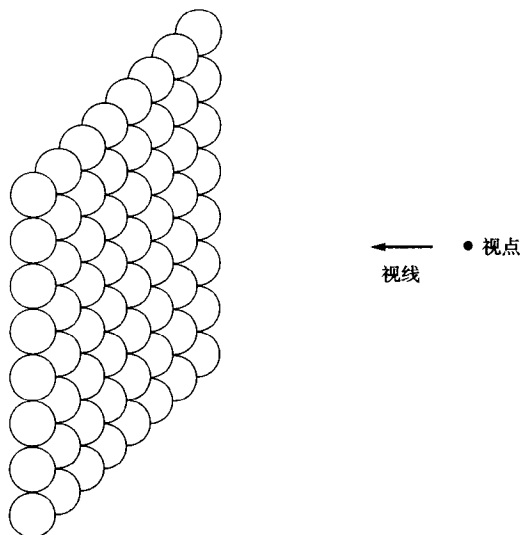


图 3.6 实验 1 所用的环境

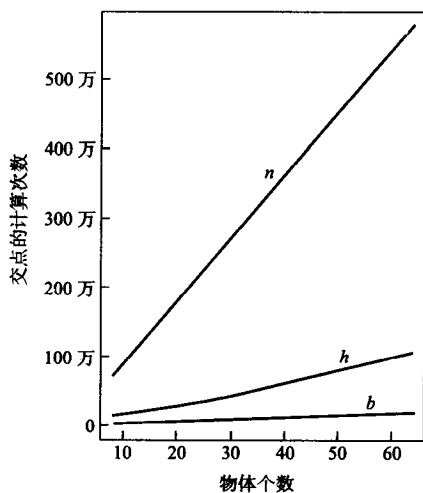


图 3.7 利用分层结构的效果

n 是不利用 BV 时的交点计算次数, h 和 b 是利用 BV (h 为与 BV 的交点计算次数, b 为与球的交点计算次数) 时的交点计算次数, 横轴是球的个数

由图 3.7 可知,物体的数目越多,BV 的利用效率越高。但是在使用 BV 的时候,与物体数一同增加的是与 BV 交点的计算,而这些计算比与物体交点的计算要容易很多。对这个实验所给出的对象,很容易获得最小的 BV,此外,构成的二叉树结果也是非常理想的。一般情况下,BV 的效果还要略微差一些。这个实验所得到的图像示例如图 3.8 所示。

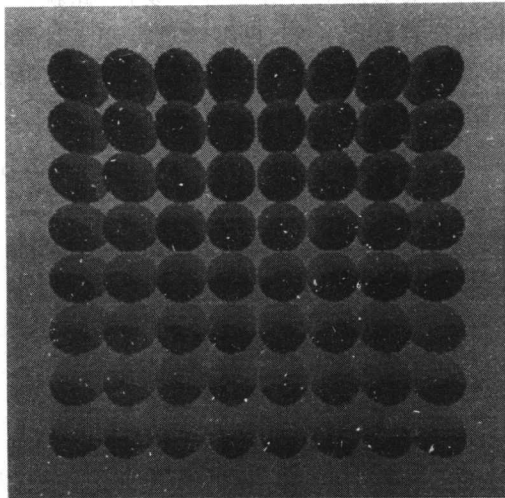


图 3.8 实验 1 所得到的图像的示例(物体数为 64 个)

★ 2. 限定物体的方法

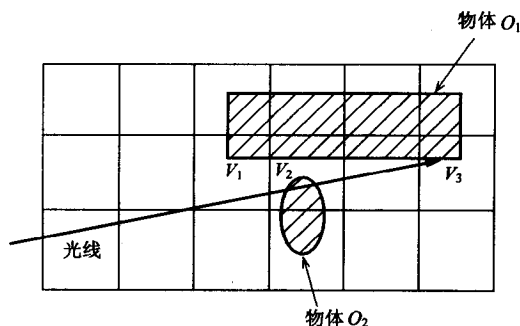
另外一个提高计算速度的方法是,限定交点计算对象的物体的方法^[7]。在这个方法中,预先将属于对象的空间分割成几个部分,之后分析在哪个部分存在哪些物体,在实际中计算交点时,只需要寻找属于光线通过部分的物体即可。

空间分割的方法有两种,一种是以固定的大小,即分割成体素(voxel)的方法;另一种是根据物体的分布来确定物体的分割程度。对于后者,可以采用八叉树的结构。对空间不断地进行递归分割运算,直到属于同一个单元的物体限定在某一个范围以内。

对于分割成体素的方法,用三维空间 DDA (Digital Differential Analyzer) 方法,可以很容易地判别出光线通过哪个体素^[7]。但是,当

空间中物体的分布有偏的时候,光线通过空间中的多个体素,此时在确定方面需要花费比较多的时间。对于八叉树的情况,与体素分割方法相比,不需要对光线通过哪个体素进行判断。

用空间分割方法时必须注意的是,交点丢失和同一个物体的交点被重复计算的情况^[8]。即使对属于某个体素(一部分)的物体的交点已经进行过计算,当这个交点不属于这个体素时,这个交点不能被采用。这时,这个物体的交点的计算全部作废,因此就希望通过某种记录方式,将丢掉的交点存储起来,再继续进行交点计算。如果不这样做的话,如图 3.9 所示,物体 O_2 就被漏掉了,体素 V_2 中,与物体 O_1 的交点被重复计算。



将体素 V_1 上光线与物体 O_1 的交点计算结果存储之后,
还要在体素 V_2 上计算交点

图 3.9 交点计算重复性的排除

〈实验 2〉对于若干种不同的对象,在其所存在的空间,以 $m \times m \times m$ 个体素进行分割后造型。现在分别对 1 000 个球在某个范围内为均匀分布和正态分布的两种情况进行讨论。像素数等条件与实验 1 相同,设分割数 m 为变量,与光线交点的计算次数的变化如图 3.10 所示。在这个实验中,判断从某个体素中射出的光线又射入到哪个体素中(贯穿体素)的计算次数如图 3.11 所示。

从这些图可以看出,体素分得越小,交点的计算次数就越少,但是贯穿体素的计算次数却只是线性增加。因此可以知道,在某个范围内,体素的分割越小,快速性的效果越好。但是,如果超过了某个限度,就失去了细化分割的效果,贯穿体素的代价将急剧增大。

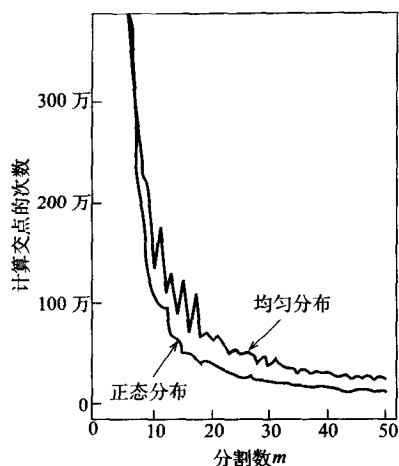


图 3.10 空间的体素分割效果
(横轴是空间的分割数)

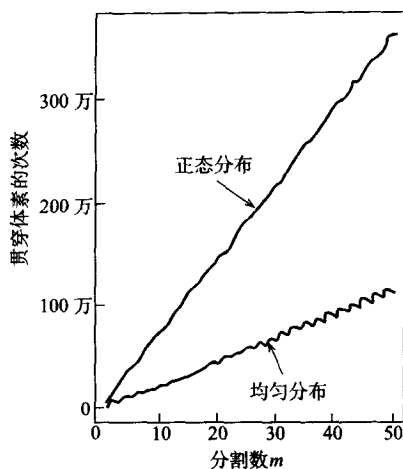


图 3.11 体素分割计算量的上升
(贯穿体素的次数)

〔实验 3〕前面的实验都没考虑反射和折射。在与实验 2 相同的环境中,将体素的分割数固定为 $25 \times 25 \times 25$,反射和折射的跟踪次数,即跟踪层变化时,交点计算次数的变化如图 3.12 所示。

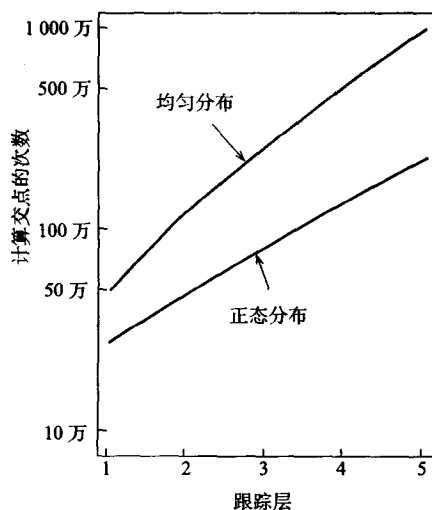


图 3.12 关于反射、折射层的交点计算次数

从图 3.12 可知,与不进行快速化处理的造型方法相同,交点的计算次数与反射、折射的跟踪水平的对数成正比。由此可知,考虑折射和反射时,体素分割可以提高计算效率。同理,当投影面上的像素数变化时,交点的计算次数也是线性变化的。同样,对于发生反射和折射的情况,分割成体素的方法也可以获得十分有效的结果。按照同样的分析方法,改变在投影面上的像素数时,交点计算的次数也是线性变化的。

均匀分布的图像如图 3.13 所示,正态分布的图像如图 3.14 所示。

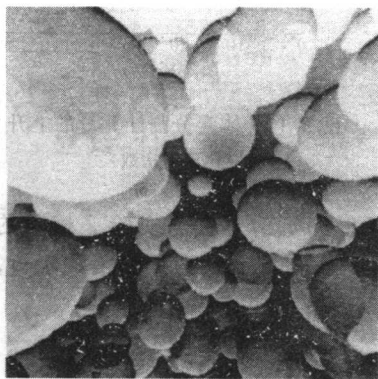


图 3.13 实验 3 所获得的图像
(均匀分布)

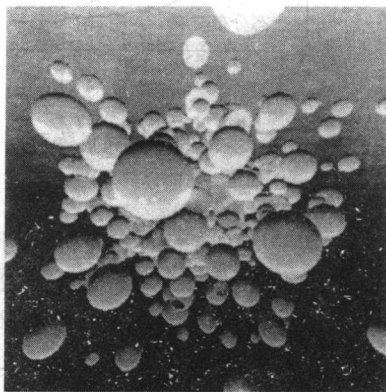


图 3.14 实验 3 所获得的图像
(正态分布)

与实验 1 的对象相同,当获得的 BV 比较小的时候,BV 的利用效果就好。此外,在空间的大小上进行比较的话,比较小的空间上,分布着多个物体的环境,体素的分割效果比较好。

当投影面上的像素数,即图像的分辨率变化的时候,来分析交点计算的次数。无论是否进行快速化处理,其计算次数几乎都与分辨率成比例的增加。因为在低分辨率图像上,可以描述画面的总体概貌,所以选择一个适当的快速化方法进行处理,之后将结果移至原来分辨率下的图像上,是一种非常有效的做法。

★ 3. 光线的一般化方法

从视点向某个像素方向发射光线,其朝着相邻像素发射的光线,

在某个对象的内部几乎通过相同的路径的情况比较多。因此,对于光线的粗细不能忽略不计。这时,需要用具有一定宽度的直线来描述光线。目前,已经发表的研究成果中,有对圆锥形或是棱锥形光线进行处理的圆锥跟踪(cone tracing)^[9]、光束跟踪(beam tracing)^[10],以及对接近光轴的光线进行处理的笔型跟踪(pencil tracing)^[11]等方法。这些快速算法除了能够提高运算速度之外,还具有抗混叠的优点,但对处理物体的形状有一定的约束,而且是否存在交点的判断也是根据近似计算得出的。

对于圆锥跟踪,从视点发出的光线是以圆锥形发散的。当存在反射和折射时,反射光和折射光也是以圆台形状范围进行跟踪的。处理对象仅限于球体和多面体,为了实现进一步的快速化,可以事先计算圆锥与平面,圆锥与球体的各种组合,并将结果以表的形式表示。

所谓的光束跟踪,是对呈棱锥形发散的光线进行跟踪。对于与多面体存在交叉、反射、折射的情况,也是在棱锥体范围内,对光线进行跟踪的。

所谓的笔形跟踪,是跟踪光轴附近(paraxial ray)的光线,对反射和折射以线性变换近似。当只有部分光线靠近光轴时,这种近似不成立,所以必须对不在光轴附近的那部分光线分别进行跟踪。

这些方法都利用了相邻光线的近似运动的性质(称之为相干性 coherence)。将这个性质以另外的角度来利用,构成的方法是,对从视点发出的光线用一个粗的采样来选择跟踪的光线,当邻接的采样光线的作用相似时,其间的像素的颜色用内插法来确定。只对不满足这种情况的部分,其间的像素通过进一步的采样来确定^[12]。

此外,对于同样的环境,生成某个场景的图像时,记录下前面的场景中的各光线的性质,在生成后面的场景时,首先判断需要重新计算的部分,只对判断为需要重新计算的部分进行计算^[13]。这是在各个场景之间利用了相干性的方法。

3.4 并行计算

光线跟踪方法的最大的特点是,各个光线之间可以完全独立地进

行处理。但是,利用这个性质在实际中设计专用的并行计算机的例子不是很多,LINKS-1 是一个非常难得的例子^[14]。

根据光线的反射与折射,在对象中可以自由地进行跟踪,各个 CPU 需要分别将所有的对象数据进行复制。所以,当对象比较复杂时,需要比较大的局部存储器(各 CPU 所固有的存储器)。对于无法实现的情况,对象中的哪个部分放在哪个局部存储器中存储,就成为一个问题。对于在各个局部存储器中,不存储全部的对象数据的情况,需要从其他的 CPU 读取相应的数据和向其他的 CPU 发送相应的数据。因此有必要探讨并行计算机系统内部的连接方式。

上述的并行计算中,多个光线的计算可以由多个 CPU 来分担,并且也可以将对象所在的空间进行分割,使每个 CPU 只对其中的一部分进行计算。这时,即使对象数据量大也没有问题。为了使每个 CPU 所负担的工作比较均衡,如何对任务进行分割是一个需要解决的问题。此外,计算结果在各个 CPU 中进行交互,也将增加信息管理的代价。

如果不使用并行计算机,直接通过网络连接计算机的话,则可以让其中的某台计算机承担相应的工作,实现分散计算。这时,各个计算机都具有比较大的局部存储器,计算机之间也可以回避频繁的信息读取。以扫描线为单位进行各个光线处理计算的分担操作是比较合适的。例如,在暑假的时候,利用学校的多数个人计算机被闲置的好机会,就可以实现上面的方案。

本章对所谓的光线跟踪的图像生成法的特点,即可以用非常简单的统一的算法来表示反射、折射等光学现象,以及交点的计算时间非常长等进行了论述。此外,对为了使造型法实用化而研究的具有代表性的快速化方法的内容及其效果进行了论述。造型法是一类其他方法无法相比的非常有效的图像生成方法,为了克服其缺点而提出的各快速化方法,目前已经成为计算机图形学中的一个研究领域^[15,16]。

然而,即使是最简单的算法,也可以生成非常漂亮的实际图像(需要花费时间),所以对于学习计算机图形学的读者,迎接造型方面的挑战是非常有意义的。

参考文献

- [1] 千葉, 村岡: レイトレーシング CG 入門, サイエンス社 (1990)
- [2] 千葉, 村岡: C による CG レイトレーシング, サイエンス社 (1991)
- [3] T. Whitted: "An Improved Illumination Model for Shaded Display", Commun. ACM, 23, 6, pp. 343-349 (1980)
- [4] A. S. Glassner: "Spacetime Ray Tracing for Animation", IEEE Comput. Graph. & Appl., 8, 3, pp. 60-70 (1988)
- [5] J. Goldsmith and J. Salmon: "Automatic Creation of Object Hierarchies for Ray Tracing", IEEE Comput. Graph. & Appl., 7, 5, pp. 14-20 (1987)
- [6] H. Weghorst, G. Hooper and D. Greenberg: "Improved Computational Methods for Ray Tracing", ACM Trans. Graph., 3, 1, pp. 52-69 (1984)
- [7] A. Fujimoto, T. Tanaka and K. Iwata: "ARTS: Accelerated Ray Tracing System", IEEE Comput. Graph. & Appl., 6, 4, pp. 16-26 (1986)
- [8] A. S. Glassner: "Space Subdivision for Fast Ray Tracing", IEEE Comput. Graph. & Appl., 4, 10, pp. 15-22 (1984)
- [9] J. Amanatides: "Ray Tracing with Cones", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 18, 3, pp. 129-135 (1984)
- [10] P. S. Heckbert and P. Hanrahan: "Beam Tracing Polygonal Objects", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 18, 3, pp. 119-127 (1984)
- [11] M. Shinya, T. Takahashi and S. Naito: "Principles and Applications of Pencil Tracing", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 21, 4, pp. 45-54 (1987)
- [12] T. Akimoto, K. Mase and Y. Suenaga: "Pixel-Selected Ray-Tracing", IEEE Comput. Graph. & Appl., 11, 4, pp. 14-22 (1991)
- [13] 村上, 広田, 石井: "アニメーション作成を高速化する部分更新レイ・トレーシング法", 日経 CG, 33, pp. 146-156 (1989)
- [14] H. Nishimura, H. Ohno, T. Kawata, I. Shirakawa and K. Ohmura: "LINKS-1: a Parallel Pipelined Multimicrocomputer System for Image Creation", Proc. 10th Symp. on Computer Architecture, SIGARCH, pp. 387-394 (1983)
- [15] J. Arvo and D. Kirk: "A Survey of Ray Tracing Acceleration Techniques", in An Introduction to Ray Tracing (ed. A. S. Glassner), pp. 201-262, Academic Press (1989)
- [16] 牧: "高速化競うレイ・トレーシング", 日経 CG, 17, pp. 98-107 (1988)

第4章

体绘制方法

体绘制方法在近些年,作为生物体以及各种三维物体的一种新型的可视化技术备受关注。这种方法根据二值化理论中的阈值处理,不仅可以以可视化的形式描述生物脏器的表面形状,而且可以根据统计优化理论,对组织进行优化分类,并对构成各个组织的体数据,由给定的不透明度,以及色彩信息进行造型。如果可以得到生物体的内部信息,则可以以自然的状态,非常细致并且准确地进行可视化描述。根据不透明度、色彩信息的给定方式,以及处理目的的不同,可以将多样化的生物信息进行可视化描述。本章以医学图像为中心,对包括自然场景描述在内的体绘制方法进行介绍。此外,对实际的X射线CT图像进行仿真,对其有效性及今后的研究课题进行论述。

4.1 体绘制方法的概要

用计算机图形学的方法表示一个三维物体,建模和造型是其主要的处理。在经典的计算机图形学方法中,一般主要使用的建模方法是表面模型的建立,而一般的造型方法则主要使用深度缓冲算法。但是,表面模型只对物体的表面进行了建模,对物体的内部则没有定义。基于光线跟踪等技术,在构成物体的表面时需要进行复杂的处理,这是一个非常明显的缺点。

体绘制方法作为一种新的可视化技术,可以描述生物体及一般的三维物体,在最近几年受到了极大的关注^[1~9]。所谓的体(volume),

是由关于物体属性的函数来定义的连续数据,或者是实际测得的非连续数据。这里所指的物体属性,不仅包括物体的表面属性,还包括物体的内部属性(如温度、密度、浓度等的分布)。对 X 射线 CT 这种医学图像,体绘制过程中的建模是将物体所在的三维空间分割成称为**体素**(voxel: volume element)的小正方体,在存储空间上定义这个三维体素序列。也就是说,对于医学图像,将原来规则排列的 CT 值等实际测得的数据,定义为分割后的体素(体数据)。另外,造型中主要采用的是光线投射(ray casting)法。所谓的光线投射法是指,以任意角度发射虚拟的平行光,根据平行光通过在三维空间上定义的体素的光量,来构造和表示三维物体的方法。光投射法是近似模拟在连续媒体中通过的光的放射与吸收,这与在第 3 章中所论述的近似物体表面的光反射与光折射的造型方法略有不同。这种体绘制方法不仅仅可以作为生物脏器表面形状的可视化方法,还可根据统计最优化理论等将组织进行聚类^[2],对于构成各组织的体素,利用给定的不透明度(opacity),以及 R,G,B 的彩色信息来进行造型处理。所以体绘制方法具有可对生物内部信息以很自然的方式进行非常细致的,并且是非常正确的可视化描述的特点。不透明度以及彩色信息的给定方式,可以根据研究目的的不同而改变,由此便可将丰富的生物信息等进行可视化处理。但是,体绘制方法通常比造型方法需要处理更多的信息,所以快速的、大容量的图像存储器,以及处理体素的快速图像处理器都是不可缺少的。此外,当体素的分辨率比较低的时候,无法得到满意的画质。对于体数据,通用的区域边界检测算法,以及每个体素的不透明度的给定方法等的研究也是非常重要的。本章对医学图像的体绘制方法的体系进行总结和说明。在实际中,对 X 射线 CT 图像的仿真有效性也是今后需要研究的课题。

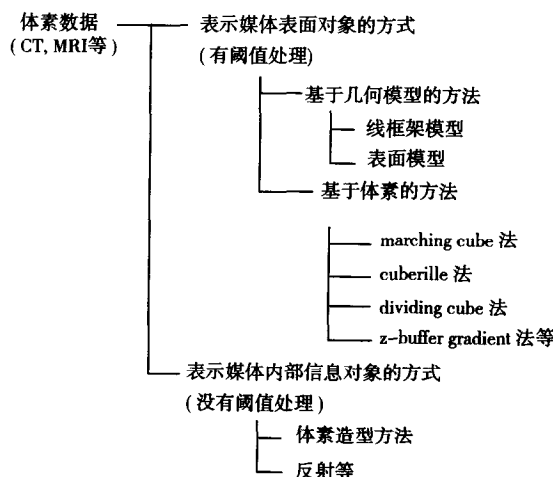
在 4.4 节中,将对非医学领域的对象,如烟这类自然物体的体绘制方法进行介绍。

4.2 造型技术的分类

以三维信息的体数据为对象,在医疗领域中应用的造型技术,如

表 4.1 所示,可大致分为表示媒介表面对象的方式,以及表示媒介内部信息对象的方式两种。前者具有根据阈值处理,检测出表面信息的特点;后者则是不进行阈值处理的方法。前者还可以进一步地分为几何模型法和体素方法^[10]。在几何模型法中,首先从 X 射线 CT, MRI (核磁共振图像)等多断面(连续多断层)图像中提取出需要造型的对象物体(例如大脑等脏器)的轮廓,并用线框图来表示。接着,将这个线框图按照一定的间隔分解成向量序列,前后断面之间进行非重叠排列,来定义由多边形构成的线框图的三维模型(线框架模型)。最后,将这个模型向二维投影面进行投影和表示。各个多边形之间进行平滑处理,可以根据需要进行着色(表面模型)、投影和表示。彩图 4.1 是由 MRI 合成的头部皮肤面(线框架模型)和脑表面(表面模型)的三维图像。

表 4.1 体可视化的方式分类(体绘制方法所处的位置)



体素方法与几何模型方法的不同之处是,不是根据多边形来构成三维模型的,如图 4.1 所示,是由体素的三维排列来构成三维模型的。在体素上定义体素值(通常在 X 射线 CT 中被称为 CT 值,在 MRI 中称为 T_1 和 T_2),对体素值进行阈值处理,获得表示对象的区域,例如提取出骨的区域等。也就是说,经过阈值处理之后,是骨的对象区域的体素值为 1,不是骨的区域(背景)中的体素值为 0,转换成二值体素

结构的数据。因此,对象区域以外的信息即使是有用的,也完全丢失了。彩图 4.2 是由体素法生成的三维 X 射线 CT 图像。骨以外的信息不作特别处理,也不显示。

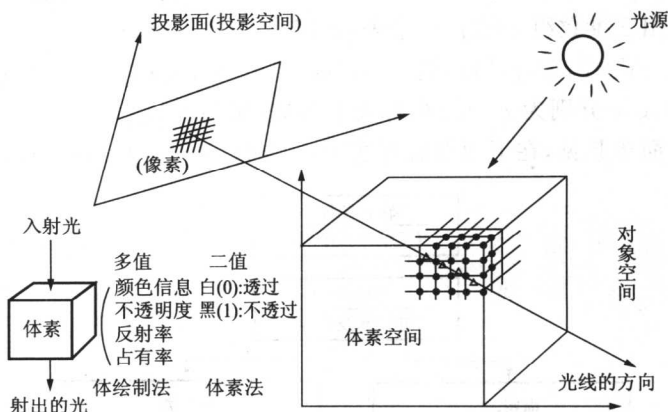


图 4.1 体绘制原理

在 4.3 节之后所论述的体绘制方法中,将所有的信息作为体数据保存起来。表 4.1 中所列出的体数据的造型也称作体绘制。

4.3 体绘制方法^[1,2]

所谓的体绘制方法,是对在三维空间上定义的三维物体,从任意的视点来跟踪体素(光线跟踪),不仅构造出组织间的边界面,对其内部的信息的结构也根据透明度实现可视化的方法。因此,对每个体素值,需要预先定义不透明度和色彩信息,根据对体素值的运算,将脏器等复杂的生物结构以丰富的可视化的形式表示出来。图 4.2 是体绘制方法的一般处理流程^[1]。如图 4.2 所示,体绘制的主要特征是,在分类操作中,求生物各组织的不透明度;在描影操作中,根据预先给定的颜色信息求出颜色的深浅,之后用造型技术将其合成,构成造型图像。下面,就处理过程中的各个环节进行论述。

★ 1. 图像的输入与建模

将 CT 或者是 MRI 的多断层数据输入到计算机中时,体素在存储

器中是以三维数组的形式存储的(参见图 4.1)。在体绘制处理中,这个体素的三维数组的结构就是三维物体的模型。

一般情况下,医疗诊断设备中所给出的检测数据,即体素值为整数。设体素值为 $f(i, j, k)$ (i, j, k 分别为 x, y, z 的坐标),则三维物体 V 可以用三维数组 $f(i, j, k)$ 来表示,即

$$V = [f(i, j, k) | 1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq q, 1 \leq k \leq r] \quad (4.1)$$

式中, p, q, r 分别为 x, y, z 坐标的上限值(正整数)。

为简单起见,在下面的展开式中, $x_i = (i, j, k)$, $f(x_i) = f(i, j, k)$ 。

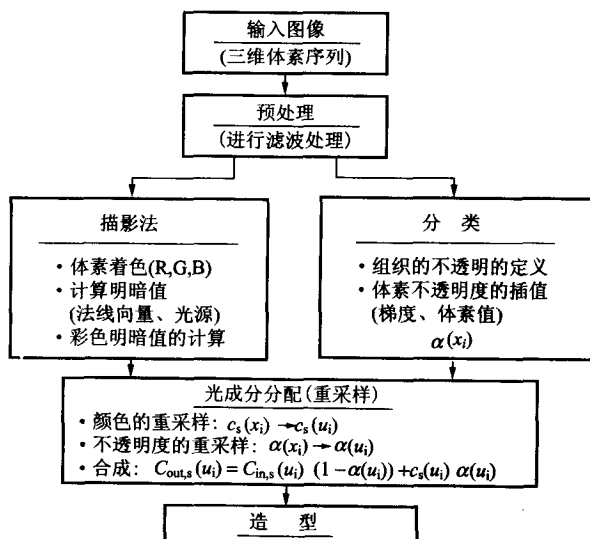


图 4.2 体绘制的处理流程^[1]

★ 2. 预处理

在预处理中,对原始的体数据进行除噪声、图像增强等处理,可以使后面的分类等处理比较容易进行。这时,可在体素空间上,用边界增强,以及图像平滑等三维图像的处理算法来进行处理^[11]。

★ 3. 分类

在分类处理中,预先给典型组织设定一定的不透明度 α_v ,对属于其他非典型组织的体素值所固有的不透明度 $\alpha(x_i)$,则通过插值处理来获得。这时,不透明度的确定方法有两种,一种是将获得的体素不

透明度原封不动地填到当前体素相应的位置上；另一种是根据周围体素的不透明度，以及梯度值来确定当前体素值^[1]。考虑梯度值的原因是为了增强不同生物组织之间的边界。

如图 4.3 所示，这里对多个不同生物组织边界上的体素值 $f(x_i)$ （一般是标量值）和与之对应的不透明度 $\alpha(x_i)$ ，给出了如下关系式：

$$(f_a, \alpha_a), (f_b, \alpha_b), (f_c, \alpha_c), f_a \leq f_b \leq f_c$$

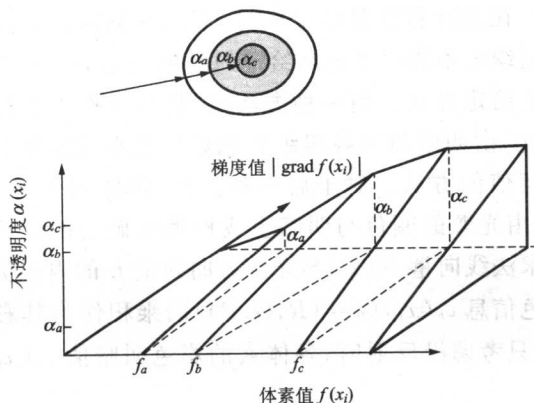


图 4.3 不透明度、体素值以及梯度值的关系^[1]

这时，考虑了梯度值的任意体素的不透明度 $\alpha(x_i)$ ，可由下式，即由 $f(x_i)$ 的大小确定的 $f(x_i)$ 的梯度绝对值（图 4.3 所示的梯度值），以及不透明度的插值的乘积 * 给出^[1]：

$$\alpha(x_i) = |\text{grad } f(x_i)| * \begin{cases} \alpha_a \frac{f(x_i)}{f_a}, & f(x_i) \leq f_a \\ \alpha_b \frac{f(x_i) - f_a}{f_b - f_a} + \alpha_a \frac{f_b - f(x_i)}{f_b - f_a}, & f_a \leq f(x_i) \leq f_b \\ \alpha_c \frac{f(x_i) - f_b}{f_c - f_b} + \alpha_b \frac{f_c - f(x_i)}{f_c - f_b}, & f_b \leq f(x_i) \leq f_c \\ \alpha_c, & f_c \leq f(x_i) \end{cases} \quad (4.2)$$

式中， $\text{grad } f(x_i) = \text{grad } f(i, j, k) = \left(\frac{f(i+1, j, k) - f(i-1, j, k)}{2}, \frac{f(i, j+1, k) - f(i, j-1, k)}{2}, \frac{f(i, j, k+1) - f(i, j, k-1)}{2} \right)$ 。

对于具有多个不同的典型生物组织的边界面上的不透明度,即 $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ 的确定方法与造型精度之间的相互关系的研究是非常重要的研究课题,在 4.6 节中,将对此进行讨论。

☆ 4. 明暗生成

在明暗生成操作中,对每个体素,由周围体素值求出的 gradient 作为该体素上的法线向量,之后加上光源,用 Phong 明暗生成模型,求出其明暗值。在进行彩色明暗生成时,可以根据两种方法来实现,一种是与每个组织的不透明度一起给定的颜色信息的求解方法;另一种是着色光源的给定方法。前一种方法是,将体素作为着色的反射面,光源是白色光,由明暗值与各组织的色彩信息来确定体素的颜色值,即求彩色明暗值的方法。对于后一种方法,将体素作为无色的反射面,其颜色是由光源的颜色与明暗生成模型来确定的。具体地说,前一种方法是求法线向量 $N(x_i)$ 与光源方向向量 L 的内积值,将其与各体素上的颜色信息 $c_k(x_i)$ ($k=(R,G,B)$) 的乘积作为其彩色明暗值。也就是说,在只考虑漫反射时,各体素的彩色明暗值 $c_s(x_i)$ 可由下式计算得到:

$$c_s(x_i) = h(N(x_i) \cdot L) * c_k(x_i) \quad (4.3)$$

式中, h 是漫反射关于明暗生成的函数,是考虑了镜面反射以及更复杂的情况的计算。但是,在一般的医学图像中,只考虑漫反射已经足够了。

法线向量 $N(x_i)$ 可由下式求得:

$$N(x_i) = \frac{\text{grad } f(x_i)}{|\text{grad } f(x_i)|} \quad (4.4)$$

☆ 5. 光线跟踪

在光线跟踪中,如图 4.1 所示,从任意角度发出的平行光,通过在三维空间上定义的体素,通过对它的计算,可求出最终在投影面上投影的像素值。

具体地说,对于每个体素,当光入射时,在 3 与 4 的处理中,对各体素预先给定的不透明度 $\alpha(x_i)$,与彩色明暗值 $c_s(x_i)$ 作相乘运算,就得到了通过该体素的光强度。但是,因为光对于体素,一般是以任意的角度射入的,而通常设置的体素面是垂直于入射光的,所以光线跟

踪的各个步骤中,如图 4.4 所示,需要置换体素点的排列方向(重采样)。所谓的重采样,是将近邻体素的彩色明暗值 $c_s(x_i)$ 和不透明度 $\alpha(x_i)$ 作插值运算(如八点插值),从而获得重采样后的新的彩色明暗值 $c_s(u_i)$ 和不透明度 $\alpha(u_i)$ 的方法(u_i 表示重采样坐标)。接下来进行重采样的合成^[1]。即对于与视线平行的体素,将前面来的光(色)与自身的亮度,以及被光源照射的反射光(色)进行合成。在通过体素时,从最后的体素发出的光(色)就是造型图像上的像素值。式(4.5)是三维空间上的体素向二维投影面上的投影关系式。

$$C_{out,s}(u_i) = C_{in,s}(u_i)(1 - \alpha(u_i)) + c_s(u_i)\alpha(u_i) \quad (4.5)$$

式中, $C_{in,s}(u_i)$ 是前面过来的光, $c_s(u_i)\alpha(u_i)$ 是当前体素的彩色明暗值, $C_{out,s}(u_i)$ 是射向下一个体素的光(色)。

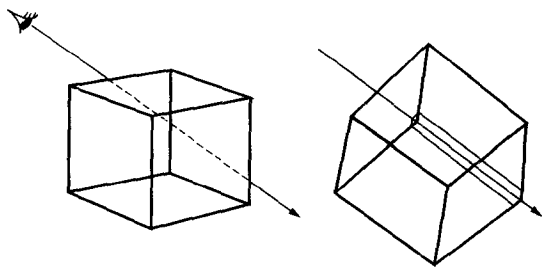


图 4.4 光的方向图重采样前后的体素

用式(4.5)对每个体素进行计算,获得光线的颜色及不透明度,对该体素的颜色和不透明度进行更新,当透明度为 0 时,光线的跟踪计算终止。

通常,重采样和光线跟踪是同时进行的。如果用个人计算机这种不具有足够存储空间的处理系统来处理,或者是对颜色及不透明度的值尝试错误而需要对其进行改变后再执行操作时,采用将这两个处理分开,对重采样预先进行处理等手段,可以提高算法的运算速度。

在体素法中,图 4.1 所示的体素值只取透明、不透明(0,1)二值,在投影面上构成的投影像素是光线最先到达不透明体素的距离值(深度值)。彩图 4.2 是按照这种方法构成的三维图像。与之相对应的是,体绘制方法中的体素是以不透明度描述的多值体素。

4.4 自然物体的体绘制方法

除了对医疗数据进行可视化描述之外,有时还需要对在空间中分布的物体的形状,或者是物理量的空间分布状态进行观察。为此,首先要真实地表现自然场景,需要对云、雾、烟等这类在空中漂浮的雾状物质进行描述,这些物质都是由空间中的水珠等细微颗粒的集合汇集在一起,使其散乱分布,而导致人在视觉上看起来感觉模糊不清的雾状物。

微小颗粒的集合体的层面上的光的透射、反射的基本模型已由 Blinn 提出^[12]。这是一种考虑眼睛看不到的、非常小的颗粒在空中存在随机分布的层,从视点向该分布层眺望的时候所看见的图像的模型。这个模型包括了光源照射在微小颗粒层时,微小颗粒向视点反射的效果,以及颗粒层后的物体因该颗粒层的存在,好像蒙着一层纱的效果两个部分。在 Blinn 模型的基础上,Kajiya 提出了当空间中的密度及形状一起改变时,用三维体数据表示密度分布的方法。这也是一种著名的体绘制方法^[13]。这是一种表示雾状物质的空间分布的方法,与 4.3 节中所介绍的医学领域中所使用的体绘制方法在内容上是不相同的。

在此基础上,对于不单纯是微小颗粒的集合体,而且还包括线状或者是面状的,具有微妙形状的集合体的表示方法,即纹理影射方法也被提了出来。

★ 1. 体绘制方法

体绘制方法是一种用体数据(三维数组)表示空间中的微小颗粒密度,并用这个值来计算光在微小颗粒层的反射及散射的方法^[13]。这个算法的概念图如图 4.5 所示。这里,在每个格子点上,给出了微小颗粒的密度。计算光在微小颗粒层上的透射强度时,分成了从光源到颗粒,从颗粒到视点两个阶段。首先,在第一阶段,从光源发出的光,到达各个格子点上的光线强度,与在格子点上微小颗粒的密度对应地衰减。考虑这一情况之后,在各个格子点上,逐次计算其光的强度。在第二阶段,从某个方向观察体空间时,求朝着视点方向反射的光线

强度。与在第一阶段中得到的各格子点上的光强度的计算方法相同,计算在格子点上反射,到达视点的光的衰减。某光线的强度(亮度)由每个体要素(格子点要素)的计算结果之和给出。

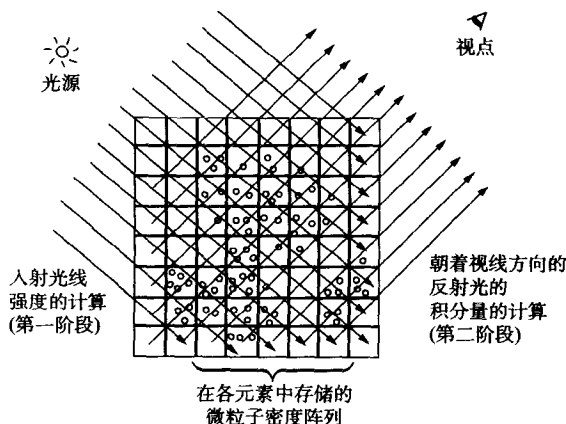


图 4.5 体绘制方法

☆ 2. 纹理元素(texel)造型方法

观察动物表面的皮毛层,地毯表面,以及鸟瞰大山表面的森林层等,表面都会有一层模糊不清的毛绒绒的雾状物。这与所看到的细微颗粒层具有的性质是类似的。这不是单纯的球集合所构成的层面,而是由其内部具有一定形状特征的物体的集合所构成的,所以光的反射、散射的特征也不同。Kajiya 将层中的微小物体的形状和反射特性在分割成空间中的小区域上进行描述。这种将原始形状(例如动物的表皮)用纹理元素排列的表面层结构进行表示,来计算光的反射、散射的方法称为纹理元素造型方法^[14]。将希望表示的物体表面(例如皮毛、树皮等)在分割后的三维空间上的局部小区域上进行描述,每个小区域上,包含了物体结构要素的某一部分,构成包含要素区域表面的是微小面集合。将这些微小面集合的个数、平均方向、各个微小面的反射特性作为该区域所包含物体要素的特征来描述,称之为纹理元素(texel)。对这个纹理元素排列层的光的反射与散射的计算方法基本上与体绘制方法相同。

4.5 仿真实验

以头部的 X 射线 CT 图像为研究对象,在这里介绍体绘制方法的计算机仿真实验。下面就处理条件、计算方法,以及处理结果进行介绍。

★ 1. 处理条件

透过表皮观察头骨的造型,仿真实验中所设定的由不透明度和颜色信息构成的体素值如下所示:

	体素值	不透明度	颜色信息(R,G,B)
头骨	100~255	1.0	200,200,200
表皮	0~80	0.3	255,128,64

本仿真实验中的各个体素值的不透明度,是根据图 4.3 所示的那种,用典型体素的不透明度,与该体素值附近的最大梯度值 (gradient),进行插值处理后求出的^[1]。

★ 2. 计算方法

光线跟踪的各个步骤中,执行如下的处理。图 4.6 给出了执行的流程。

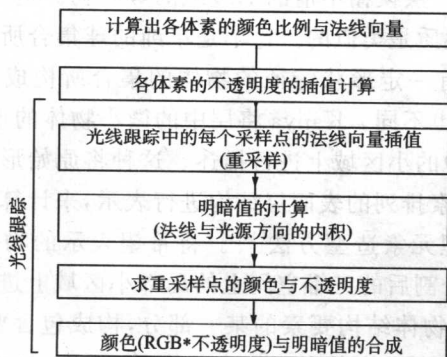


图 4.6 仿真实验的执行流程

① 插值计算周围体素的梯度,求出光线跟踪中各采样点(重采样)上的梯度,作为该点上的法线向量;

② 求光线方向向量和在①中所求得法线向量的内积,得到明暗值;

③ 对周围体素的体素值进行插值,求光线跟踪中的每个采样点上的体素值,由这个值求出采样点上的颜色与不透明度,即该采样点上的颜色为“RGB 值 * 不透明度”;

④ 将③中所求得的采样点上的颜色乘以明暗值,作为该采样点的颜色值(RGB)。

★ 3. 实验结果

彩图 4.3 是体绘制实验的结果。表皮的不透明度分别为 0.7, 1.0 时,进行同样的处理所得到的结果如彩图 4.4 和彩图 4.5 所示。

由这个仿真实验可知,透过表皮可以观察头骨,其程度可以通过调整不透明度的值来进行自由的控制。当不透明度为 1 时(参见彩图 4.5),与经典的造型方法(阈值处理)的结果相同。

4.6 今后的研究课题

根据上面的仿真实验可知,体绘制方法与经典的基于阈值处理的造型方法不同,因为所有的体数据都是可视化的对象,所以对于每个体素的不透明度,颜色信息的给定方法的不同,可以开发出多种可视化技术。以下问题是今后的研究课题。

★ 1. 数据的管理与计算量的问题

体绘制是将所有的数据作为表示的对象,所以伴随而来的是对大规模图像数据群的跟踪,同时,光线跟踪的计算量也非常庞大。因此,数据库系统和快速化算法的研究非常重要。

★ 2. 画质的问题

对于光线跟踪、光线的个数及方向的不同,有可能产生混叠现象,或者非自然信号,所以需要各种情况进行仿真实验之后,对画质进行评价。此外,还需要探讨防止混叠发生的方法。

★ 3. 分类的问题

属于各个组织的体素值的不透明度,对于 X 射线的 CT,可以根据

CT 値の不同, 对不同组织进行分类。这是一般常用的传统方法^[2]。但是, 还需要研究不仅仅是对 X 射线 CT 适用, 而且对核磁共振图像等也适用的通用方法。

即使可以进行分类, 如果不知道是什么组织也没有任何意义。因此, 需要对分类后的各组织进行命名, 命名的方法有许多, 例如有利用计算机解剖索引的方法, 以及模糊区域法等^[15,16]。

参 考 文 献

- [1] M. Levoy: "Display of Surfaces from Volume Data", IEEE Comput. Graph. & Appl., 8, 3, pp. 29-37 (1988)
- [2] R. A. Drebin, et al.: "Volume Rendering", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 22, 4, pp. 65-74 (1988)
- [3] R. A. Drebin: "Volumetric Rendering of Computed Tomography Data: Principle and Techniques", IEEE Comput. Graph. & Appl., 10, 1, pp. 24-32 (1990)
- [4] J. K. Udupa and H. M. Hung: "Surface versus Volume Rendering: A Comparative Assessment", Proc. 1st Conf. on Visualization in Biomedical Computing (1990)
- [5] B. A. Payne and A. W. Toga: "Surface Mapping Brain on 3D Models", IEEE Comput. Graph. & Appl., 10, 5, pp. 33-41 (1990)
- [6] M. Levoy: "A Hybrid Ray Tracer for Rendering Polygon and Volume Data", IEEE Comput. Graph. & Appl., 10, 2, pp. 33-40 (1990)
- [7] 藤代一成, 茅 晓陽: "ボリューム・ビジュアライゼーションの基本アルゴリズム", PIXEL, 121, pp. 130-137 (1992)
- [8] 鈴木雅隆, 周藤安造: "ボリューム・レンダリング—医療画像を例として", 可視化情報, 9, 3, pp. 257-258 (1993)
- [9] 周藤安造, 鈴木雅隆: "ボリューム・レンダリングの医療応用における有効性の評価", 信学秋季大, D-186 (1991)
- [10] 周藤安造: "医用画像の3次元表示法", メディカルレビュー, 46, pp. 25-42 (1992)
- [11] 鳥脇純一郎, 鈴木秀智: "医用3次元画像の解析・認識技法", ME 誌, 3, 8, pp. 18-26 (1989)
- [12] J. F. Blinn: "Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 16, 3, pp. 21-29 (1982)
- [13] J. K. Kajiya and B. P. Von Herzen: "Ray tracing volume densities", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 18, 3, pp. 165-174 (1984)

参 考 文 献

- [14] J. T. Kajiya and T. L. Kay : "Rendering fur with three dimensional textures", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **23**, 3, pp. 271-280 (1989)
- [15] 鈴木雅隆, 周藤安造 : "ファジー領域法を用いたコンピュータ解剖アトラスシステム", 信学秋季大 (1991)
- [16] 鈴木雅隆, 周藤安造 : "ボリュームレンダリングにおけるクラシフィケーションの一提案: ファジィ領域法の適用", 第 31 回 ME 大会論 (1992)

第5章

光照模型与辐射度方法

生成具有真实感的图像的重要因素是,加入光照效果来进行表现。这种表现光照效果的模型称为**明暗模型**(shading model),或者称为**光照模型**(lighting model)。光照模型由光源的种类(几何学的形状、光谱)、阴影、反射(漫反射、镜面反射)、透射、折射、间接光(互反射光)、大气泛光等要素构成。因为已经在第3章中对反射、透射、折射等进行了说明,所以本章只对其余的要素进行论述。生成具有真实感的图像方法中,光线跟踪法是一种著名的方法,与这种方法相同,**辐射度方法**作为一种可生成具有真实感图像的方法受到了极大的关注。所谓的辐射度方法是一种根据互反射来计算间接光的方法,下面将对其进行详细的介绍。

5.1 光的种类与反射光

照射物体的光分为直射光和间接光。直射光是不经过反射而直接照射在物体上的光。间接光是在墙壁等障碍物上经过几次反射后,经过大气中微小颗粒的反射,照射在物体上的光。这种间接光又称为环境光。一般情况下,是按照一定的亮度照射在整个画面上的。在更加精密的模型中,考虑了光的互反射情况。这些光的起源当然就是光源。光源又分为平行光线、点光源、具有扩散幅度的光源等。具有扩散幅度的光源是指线光源、面光源、多面体(曲面体)光源等。

如果从物体表面的反射特性来考虑的话,有漫反射和镜面反射。对应于平行光线的反射光的计算,在第3章中已经进行了介绍,所以

在这里我们将对其他种类光源的直射光的漫反射部分的计算方法进行论述。

★ 1. 点光源

对于点光源,可以利用光的能量是距离倒数的平方这一准则。与平行光相同,服从朗伯余弦定理。因此,如图 5.1 所示,点 P 的反射光的强度设为 I_d ,光源的光强度设为 I_Q ,则有

$$I_d = I_Q \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2} \cdot R_d \quad (5.1)$$

式中, α 是面法线 N 与光线所夹的角, R_d 是漫反射率, r 是光源与点 P 的距离,一般情况下, I_Q 取为一个常数。但是,实际的光源有其各自固有的配光特性。即光源的 I_Q 如图 5.1 所示,灯轴与光的发射方向有角度为 θ 大小的差异,所以应该为 $I_Q(\theta)$ 。虽然实际的配光非常复杂,但是可以尝试用简单的方法来表示。例如像聚光灯这种只在某个方向上具有很强配光特性的 $I_Q(\theta)$,可用下式来计算:

$$I_Q(\theta) = I_0 (\cos \theta)^n \quad (5.2)$$

式中, I_0 是 $\theta=0$ 时的光的强度, n 越大,照射光的指向性越强。此外, $I_Q(\theta)$ 还可以由下式计算:

$$I_Q(\theta) = I_0 [(1-q)(\cos \theta - \cos \gamma) / (1 - \cos \gamma) + q] \quad (5.3)$$

式中, r 是光束的幅度(限定了照射的范围), I_0 是 $\theta=0$ 时的光的强度。 q (一定光度的配分比, $0 \leq q \leq 1$) 越大,则照射光的边界越锐利。对实际的照明进行仿真,输入其配光数据(例如,按照每 5 度的间隔),中间光的强度可用插值法求得。

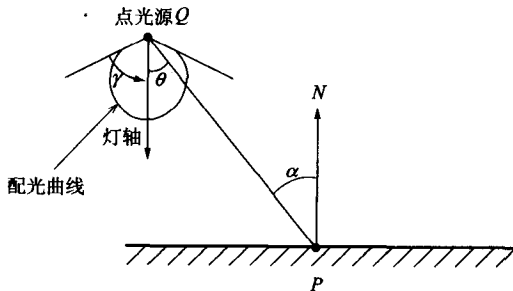


图 5.1 点光源的反射光强度

☆ 2. 线光源^[1]

所谓的线光源可以认为是点光源在直线上排列构成的光源。光的放射强度与线光源的垂直方向所成的角 θ 的余弦成正比。因此,如图 5.2 所示,点 P 的反射光的强度设为 I_d ,线光源的单位长度上的光度设为 I_Q ,光源的长度设为 L ,则 I_d 可由下面的积分式来表示:

$$I_d = I_Q \int_0^L \frac{\cos \theta}{r^2} \cdot \cos \alpha \cdot dl \cdot R_d \quad (5.4)$$

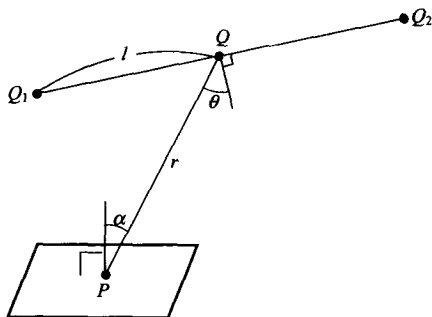


图 5.2 线光源照射下的反射光强度

☆ 3. 面光源及多面体光源^[2]

图 5.3 是一个 m 多面体光源,若从光源发射出的光的放射特性完全扩散,则利用边界积分法可以求出点 P 的反射光强度 I_d 。面光源的单位面积上的光度设为 I_s ,则有

$$I_d = I_s \sum_{i=1}^m \delta_i \cdot \cos \beta_i \cdot R_d \quad (5.5)$$

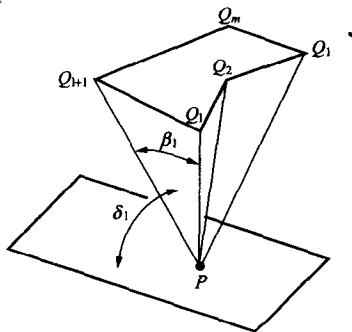


图 5.3 利用边界积分法的面光源照射下的反射光强度

式中, δ_i 是三角形 $Q_i P Q_{i+1}$ 与包含点 P 的面的夹角, β_i 是 PQ_i 与 PQ_{i+1} 的夹角。

对于多面体光源, 当从点 P 向多面体光源方向观看时, 可以将各个面光源作为可视面。

★ 4. 天空光^[4]

在表示建筑物等户外物体的时候, 需要考虑到自然光。自然光(白昼光源)由直射日光和大气中的微小颗粒反射的泛光(天空光)两部分组成。因为天空非常广阔, 所以任意的计算点都可以看成是半径非常大的圆形顶的中心, 即相当于半径很大的半球光源的计算。前面所讨论的光源都是假设其亮度为均匀分布的, 但是天空光的亮度却是随着时刻、天气, 以及季节的变化而变化的。可将这个圆形顶分割成小的面素来进行积分运算。因为积分区域的大小受到阴影的影响, 所以其计算方法是根据对阴影的判断来实现的, 这部分内容将在后面介绍。

5.2 阴影的处理

受遮挡的物体会产生阴影是现实场景中所具有的现象, 因此, 考虑阴影的影响是非常重要的。阴影是写实性表示中不可缺少的部分, 阴影的计算方法很大程度上依赖于光源的种类。

★ 1. 不具有扩散幅度的光源照射下的阴影的计算

从光源发射出的直射光完全照不到的地方称为阴影, 当忽略环境光时, 其照度为 0。相当于平行光线及点光源这种没有扩散幅度的光源照射所产生的阴影。

(1) 基于光线跟踪法的阴影计算 根据光线跟踪法, 逆向搜索视线求得视点与光源之间的直线段。期间如果存在一个物体, 则该点就是一个阴影中的点。用这个非常简单的方法虽然可以获得阴影, 但是其处理时间非常长。

(2) 扫描线单位的方法^[4] 这是一种将每个扫描线, 在从光源到需要对多边形的各边进行处理的面上进行投影的方法, 是一种可以描述阴影的方法。

(3) 分层处理法^[5,6] 如图 5.4 所示,分别求从光源和观察者的眼睛所看到的透视图,在表示时,对阴影区域进行匹配的方法称为分层处理法。这种方法利用了一个结论,即从光源观察的不可视区域是从视点看到的区域的结论。实现方法分为扫描线法和深度缓冲法。

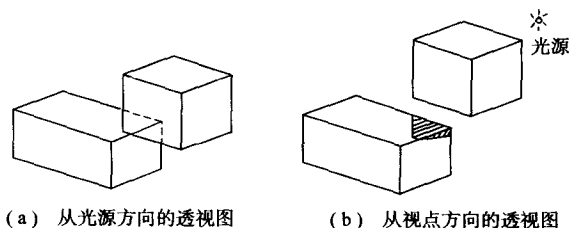


图 5.4 基于分层法的阴影的提取

(4) 阴影多边形法^[7] 这是一种在生成物体数据时,求阴影多边形(shadow polygon),将其进行表示处理时所采用的方法。如图 5.5 所示,点光源 Q_e 和遮挡面 V 所生成的阴影区域,在由点 Q_e 和面 V 所构成的棱锥中,从点 Q_e 所看到的比遮挡面 V 更远的空间上所构成的阴影多面体(shadow volume)的内部。这个多面体与被照射面交叉部分就是阴影的区域(图中用阴影线表示的部分)。

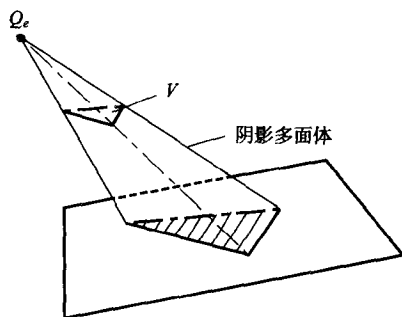


图 5.5 基于点光源的阴影多边形

方法(3)和方法(4)的处理时间比较短,与前两种方法相比,需要更多的数据区域。彩图 5.1 是用光线跟踪法进行的点光源的计算示例。

☆ 2. 具有扩散幅度的光源照射下的阴影

观察具有扩散幅度的光源照射下的阴影,要获得写实性的图像,

其计算是非常复杂的。当考虑线光源^[1]、面光源^[2]、天空光^[3]这种具有扩散幅度的光源时,其阴影区域分为完全照不到光的全阴影区域和可以被一部分光源照射到的半阴影区域两个部分。

(1) 近似的求解方法 这是一种在具有扩散幅度的光源的表面,设置若干点光源,以对点光源集合处理的方法来对其进行近似处理的方法。这种方法在处理阴影的时候,具有检测发生阴影物体有偏差,并且计算误差大的缺点。

(2) 基于积分法的求解方法 图 5.6 是一个多面体 V 在三角形光源 S_c 照射下的完全阴影区域和半阴影区域。图中,交叉阴影线表示的部分为完全阴影区域,用斜阴影线表示的区域为半阴影区域。半阴影区域中的亮度,依赖于从计算点向光源观看时的可视部分的大小。例如从计算点向光源观看时,图 5.7 中的斜线区域为面光源的可视区域,所以这些可视区域中新出现的点,可以认为是光源上的点,由此便可以求出计算点上的亮度^[2]。彩图 5.2 是面光源的一个示例,与彩图 5.1 相比较,就可以知道全阴影与半阴影的差异。

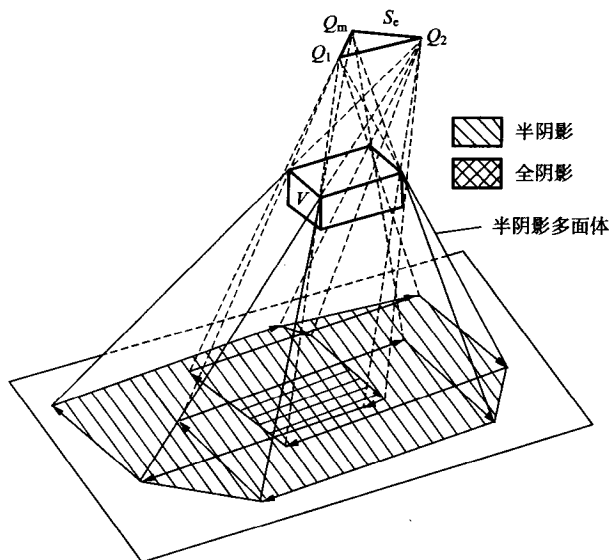


图 5.6 全阴影区域和半阴影区域

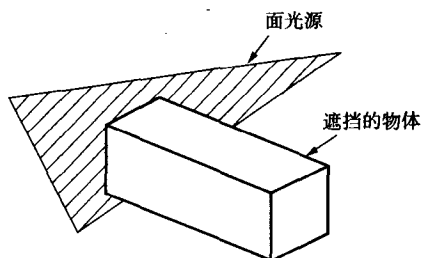


图 5.7 面光源的可视区域

(3) 天空光的计算方法^[3] 如前所述,天空可以看成是一个具有非常大半径的半球光源。如图 5.8 所示,将这个半球分割成多个带光源,则天空可以看成是带光源的集合。这个带光源的亮度,在带的长度方向上连续变化。与水平方向成 δ_i 角度的平面(称为采样面)与半球的交线,称为采样线(图中的点划线)。在考虑阴影的时候,利用从计算点 P 看到的采样线的可视区域,求各带光源的可视区域,将这些可视区域的亮度相加,就可求出全天空的亮度。如果将带光源看作是微小面积的天空要素的集合,则每个要素可以看成是一个点光源 P_e 。

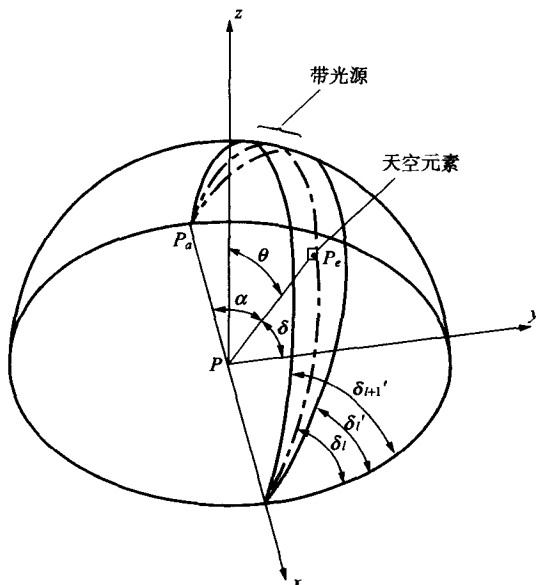


图 5.8 用带光源计算的天空光

如果 $-x$ 轴与 PP_e 的夹角为 α ,与水平面的夹角为 δ 的话,则从0到 α 之间区域的带光源亮度 $E(\alpha)$ 为:

$$E(\alpha) = d_l \int_0^\alpha L(\alpha, \delta) \cdot \sin^2 \alpha \cdot d\alpha \quad (5.6)$$

式中, $L(\alpha, \delta)$ 是天空亮度,随着天空的位置不同而不同,也随着太阳的位置、气象条件的不同而不同。 d_l 是属于某个带光源的权值,存在 $d_l = \cos \delta_{l+1}' - \cos \delta_l'$ 的关系式,一般情况下, $d_l = 1/N$ (为一常数, N 为带光源的个数)。如果带光源中,从 α_1 到 α_2 的区间为可视区间,则这个区间上天空照射的亮度可以用 $E(\alpha_1) - E(\alpha_2)$ 简单地计算出来。

将 $E(\alpha)$ 预先计算出来,存储在循环叠加表中,则可以实现计算的快速化。彩图 5.3 是多云天气下的建筑物场景的生成效果。

5.3 辐射度方法

如前所述,一般情况下,环境光完全不考虑光的方向,物体配置等的影响,并且假设其亮度是均匀分布的。但是,实际中需要考虑由于墙壁等反复反射造成的互反射光,由此增加表现效果的真实感。也就是说,考虑了互反射光之后,可以在以下几点获得更具真实感的图像:

- ① 画面中的阴影中伴有半影(模糊不清的阴影);
- ② 即使在直射光照射不到的地方,可以被互反射的间接光照射;
- ③ 反射面的颜色受邻接面的影响(称为颜色混叠)。

这种间接光具有可以表现柔和光照氛围的特征。

互反射光的计算在计算机图形学领域中称为辐射度法。具体实现这种互反射的计算方法有求解将物体的构造面分割成若干个面素的联立方程组的方法,光跟踪的扩展方法,以及将两者结合构成的方法。在互反射的计算中,形态因子(form factor)是最重要的因素。形态因子表示面素之间的能量传递的比例,因为根据集合形状就可以确定,所以即使光源的光度改变,形态因子也不发生变化。

当光源不变的时候,计算一次互反射之后,即使是视点发生变化,也可以不再重新计算。但是,因为镜面反射依赖于视点的位置,所以这种场合的处理就比较复杂。

☆ 1. 辐射度方程

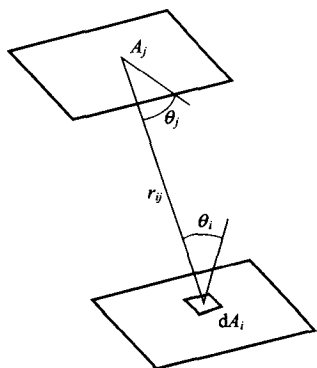


图 5.9 面素间的形态因子

将室内的构造面分割成若干个面素, 计算各面素之间能量的传递。从光源放出的光, 经过若干次反射之后, 最终在每个面素上的亮度是某一个值。图 5.9 是两个面素间的关系。设从面积为 A_i 的第 i 个面素, 到面积为 A_j 的第 j 个面素的形态因子为 F_{ij} , 则面素 i 上的亮度(或者是辐射度) E_i , 可以用下式表示:

$$E_i = E_{0i} + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} E_j \quad (5.7)$$

式中, ρ 为反射率, E_{0i} 为放射光(一般是指直射光的亮度), E_j 为面素 j 的亮度, n 为面素的个数。这里, 面素 i 的亮度可以由其他所有面素来的入射光的总和与反射率相乘的结果得到。每个面素的亮度由式(5.7)的 n 元一次方程组的解给出。即可由下式求得:

$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \cdots & -\rho_1 F_{1n} \\ -\rho_2 F_{21} & 1 - \rho_2 F_{22} & \cdots & -\rho_2 F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -\rho_n F_{n1} & -\rho_n F_{n2} & \cdots & 1 - \rho_n F_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{01} \\ E_{02} \\ \vdots \\ E_{0n} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

式(5.8)可由 Gauss-Seidle 算法求解。形态因子的物理含义是, 从面素 i 的所有点放射出的能量被面素 j 接收的比率, 可由下式求得(参见图 5.9):

$$F_{ij} = \frac{1}{(\pi A_i)} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r_{ij}^2} dA_j dA_i \quad (5.9)$$

就像在室内放置课桌这种情况, 一般在面素间存在障碍物(其他的面素)的情况比较多, 因此在形态因子的计算中需要考虑障碍物这一因素。

☆ 2. 形态因子的计算

形态因子最初是在面素间定义的, 也可以方便地在某个面素上

的一点与其他面素之间求得。因为假设面素内的亮度是相同的,所以点与面素间的形态因子,乘以包含这点的面素的面积,就可求出两个面素间的形态因子。以计算点为中心,向半球表面投影的面素,与将面素正投影到半球底面的底面积成正比。但是因为这个计算非常复杂,所以可采用下面的近似方法来进行计算。

(1) Hemi-cube 方法^[8] 这是一种用半立方体近似半球的方法。如图 5.10 所示,在面素的中心放置一个立方体,将每个面分割成网状。对于每个网格,预先求出形态因子的比例(称为 δ 形态因子)。最基本的,将计算点作为视点,将半正方体的表面作为投影面考虑时,用基于 Z-缓冲方法的面消隐方法^[9],可获得遮挡效果。也就是说,对于考虑阴影的形态因子,从面素的中心观看,对覆盖面素的可视区域(图 5.10 中斜线标识的部分)的网格内的 δ 形态因子进行求和计算。值得注意的是,因为离散化采样处理,会产生混叠,以及精度上的一些问题。

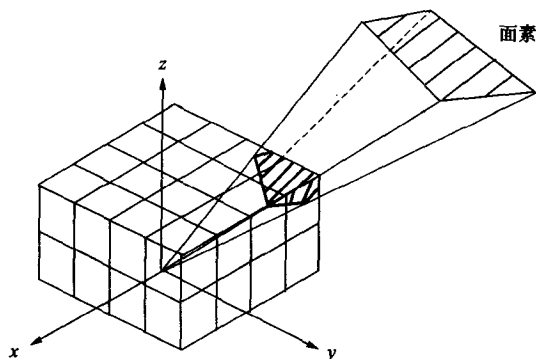


图 5.10 Hemi-cube 方法

(2) 线采样法 由西田等人提出的方法^[10]是,将面 S_b 分割成网格状,若干个连续的面素的边界线(即网格的分割线)可以认为是线光源,因而可利用边界线的可视区间(可视区间上的所有网格均为可视)。考虑面 S_a 上的点 P_i 与面 S_b 上的面素(包含点 P_j),面素可以认为是非常小的面,则形态因子可由下式求得。

$$F_{ij} = d(S_a, P_j) d(S_b, P_i) A_j / (\pi r_{ij}^4) \quad (5.10)$$

式中, $d(S_a, P_j)$ 表示面 S_a 与点 P_j 的距离。 r_{ij} 表示 P_i 与 P_j 的距离。在这个方法中, 是以线为单位进行面消隐的, 所以比点采样有更好的效率, 但是仅限于凸多面体。

(3) 基于光线跟踪的方法 Hemi-cube 法是根据计算点(面素的中心点)上发射出的光来进行面消隐的。因此, 当前采样点和下一次的采样点之间需要加入相关的检测面素时, 会发生采样偏差。所以, Wallace 等人^[10]提出了从相关面素发射出的光射到计算点上的方法来解决这个问题。在这个方法中, 面素是由若干个圆盘的集合来近似的, 从圆盘的中心发射出光。因此, 面素 j 上的圆盘与面素 i 上的点 P 之间的形态因子, 可由下式计算得到:

$$F_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\cos\phi_k \cos\phi_{jk}}{\pi r_k^2 + A_j/m} \quad (5.11)$$

式中, m 为圆盘个数, A_j 为面素 j 的面积, ϕ_k 为圆盘 k 的法线与点 P 方向的夹角, ϕ_{jk} 为面素的法线与圆盘 k 的夹角, r_k 为圆盘 k 与点 P 的距离。

彩图 5.4 是利用光线跟踪法的扩展方法^[12]所获得的计算示例(对具有天井的曲线边界的光源的互反射光进行计算)。从这个例子可知, 由互反射所生成的柔和的阴影可以增加真实感。

5.4 大气的效果

大气中的微小颗粒对光的吸收、漫射, 不仅会产生不透明的效果, 而且对远处物体的颜色也会蒙上一层灰色, 由此可以增加远近的距离感。另外, 大气中的微小颗粒受到光的照射之后, 发生散射, 使光的投射范围内的空间都变的很亮。自然界中, 在云的缝隙处、大楼的门窗等透光处, 可以观察到照射进来的太阳散射光。

★ 1. 雾层的效果

大气中的微小颗粒受到光的散射之后, 由于其吸收效果, 使远处的物体失去反射光的彩色。一般情况下, 这种反射光是按照距离的指数函数衰减的, 可由下式表示:

$$C_i' = (1 - \exp(-r/L))(F_i - C_i) + C_i \quad (i=R, G, B) \quad (5.12)$$

式中, C_i 为物体的颜色 (C_R, C_G, C_B 分别表示颜色中的红, 绿, 蓝三原色), C_i' 为到达视点的光的颜色, F_i 为无限远处大气的颜色, V 为物体与视点间的距离, L 为表示雾层程度的常数, L 越小雾层越深。换句话说, 当 r 比较小时, 颜色接近 C_i ; 当 r 比较大时, 颜色接近 F_i 。

★ 2. 大气泛光的表示^[13]

如图 5.11 所示, 物体 V 上的任意一点 P 上射出的光朝着视点 P_v , 通过点 P_s 时, 点 P_s 的光的强度 I 在其微小的区域 ds 内, 由对光的吸收和散射而衰减的部分, 以及该区域内的大气散射在视线方向上的散射部分来确定。将该光度进行积分运算, 达到视点的物体表面的光可由下式表示:

$$I = I_i \exp(-\sigma L) + I_a (1 - \exp(-\sigma L)) + \int I_Q(\theta) \exp(-\sigma(r+s)) \rho F(\alpha) \sigma ds \quad (5.13)$$

式中, L 为点 P 到终点的距离, I_i 和 I_a 为到达被照射面的点 P_i 的光度和环境光的光强度, σ 和 ρ 为与微小颗粒的密度有关的衰减系数和反射率, $F(\alpha)$ 为散射的相位函数, r 和 s 为光源到点 P , 以及视点与点 P 之间的距离。而 I_Q 是式(5.2)给出的配光。这里的第一项表示点 P 的光随着其通过的距离 L 的增大而衰减。 $\exp(-\sigma(r+s))$ 表示光源到达点 P 时的衰减, 也可以表示点 P 到 P_v 的衰减。彩图 5.5 是用本方法生成的点光源照射下的烟的效果。

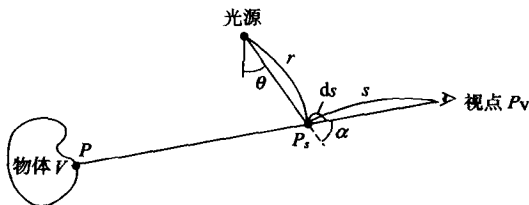


图 5.11 大气散射模型

参考文献

- [1] T. Nishita, I. Okamura and E. Nakamae : "Shading Models for Point and Linear Sources", ACM Trans. Graph., **4**, 2, pp 124-146 (1985)
- [2] T. Nishita and E. Nakamae : "Half-Tone Representation of 3D Objects Illuminated by Area or Polyhedral Sources", Proc. COMPSAC' 83, pp. 237-242 (1983)
- [3] T. Nishita and E. Nakamae : "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Illuminated by Sky Light", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **20**, 3, pp. 125-132 (1986)
- [4] W. J. Bouknight and K. C. Kelly : "An algorithm for Producing Half-Tone Computer Graphics Presentations with Shadows and Movable Light Sources", SJCC, AFIPS, **36**, pp. 1-10 (1970)
- [5] 西田, 中前 : "三次元物体の陰影表示の方法", 情報処理, **15**, 1, pp. 18-25 (1974)
- [6] P. Atherton, K. Weiler and D. Greenberg : "Polygon Shadow Generation", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **12**, 3, pp. 275-281 (1978)
- [7] F. C. Crow : "Shadow Algorithms for Computer Graphics", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **11**, 2, pp. 242-247 (1977)
- [8] M. F. Cohen and D.P. Greenberg : "The Hemi-cube : A Radiosity Solution for Complex Environments", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **19**, 3, pp. 31-40 (1985)
- [9] 中前, 西田 : 3次元コンピュータグラフィックス, 昭晃堂 (1986)
- [10] T. Nishita and E. Nakamae : "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking into Account of Shadows and Interreflection", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **19**, 3, pp. 23-30 (1985)
- [11] J. R. Wallace, K. A. Elmquist and E. A. Haines : "A Ray Tracing Algorithm for Progressive Radiosity", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **23**, 3, pp. 315-324 (1989)
- [12] 西田, 中前 : "曲面光源に照射されたパラメトリック曲面の相互反射", 情報研報, 90-CG-45 (1990)
- [13] T. Nishita, Y. Miyawaki and E. Nakamae : "A Shading Model for Atmospheric Scattering Considering Luminous Intensity Distribution of Light Sources", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **21**, 3, pp. 303-310 (1987)

第 6 章

分形

对于山岳的形态、树木、岩石等这种自然物体的形状,由于其形状的复杂性,经典的建模方法很难对其进行描述。对这个问题的解决方法之一就是由 B. B. Mandelbrot 提出的分形理论。本章首先对分形图形进行定义,并对分形维数进行简单的说明。接下来,对分叉现象、股票价格变动等非计算机图形学领域的应用示例, Mandelbrot 集合与 Julia 集合,以及图像压缩中使用的 FIS 等进行论述。在最后一节中,介绍分形在计算机图形学领域中的应用方法。其中包括分形方法在计算机图形学领域中得到广泛应用的原因, fBm 与中点变位法, 分形及其生成的规则, 在自然物体形状建模中所广泛使用的方法。最后, 简单论述与分形直接相关的内容, 以及同样在自然形状建模中广泛使用的粒子系统方法。

6.1 关于分形

有关分形的说法,是从美国的卢卡斯电影公司制作的《星际旅行 II》^[1]开始的。该影片中有这样一个镜头:火燃尽了没有生命的行星表面,使绿色的行星获得重生。这一由 Jenesys 设计的场景,非常具有现代气息,这个场景真是由计算机制作的吗(实际上这个场景如果不用计算机图形学技术是无法获得的)?成为当时大家议论的话题。这部电影公映之后,分形在计算机图形学领域中的应用掀起了一个热潮。

将分形技术进行拓展,是 IBM 研究所的 R. Voss 所制作的“由印花形山岳升起的行星”的主题宣传画,这个画面表现的是,在月球表面

眺望地球时所呈现给大家的景色,这是一个非常著名的 CG 图像^[2]。彩图 6.1 是具有代表性的 Mandelbrot 集合^[3]生成的图像。

用初期的分形技术生成的 CG 图像几乎都是山岳、地形这一类的图像。然而在最近,分形技术已经可以用来生成植物、云、岩石等各种自然物。分形理论正在为充实 CG 表现的对象物做着贡献。

本章就极为有效的自然物的表现方法,即分形方法,从其基础到应用,以及所使用的环境进行介绍。自然物的生成方法,则在下一章做详细的介绍。

6.2 所谓的分形

★ 1. 分形图形

分形理论是由 Mandelbrot 所提出的理论^[2]。图 6.1 是分形图形中具有代表的 **Koch 曲线**。Koch 曲线具有自相似性,这个特性也是分形图形所具有的一个特征。所谓的自相似性是指全局形状是细节部分的形状不断重复迭代后的结果。图 6.1 所示的 Koch 曲线,中间是突出的三角,将这个形状缩小,就构成了该图形的细节,细节部分的组合,就构成了全局图形。

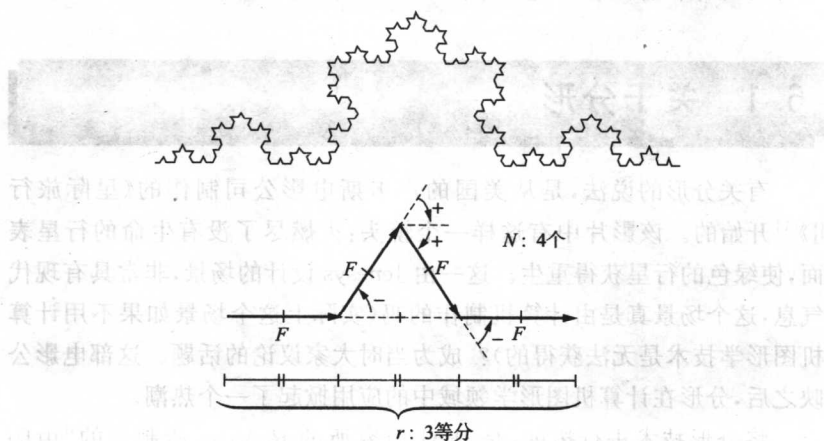


图 6.1 Koch 曲线

与此相同的现象在自然界中也存在。例如展开手边的地图册,观察海岸线。由于浪的起伏、火山的爆发等自然力的作用,使海岸线成为一条复杂的曲线。观察这些曲线,整体的凹凸情况具有细节上的凹凸特征。用 10km 的标尺度量到的形状,也可以用 1km 的标尺度量到。换种简单的说法,凹凸比较剧烈的海岸是因为岸边全部都是岩石,平缓的海岸是因为岸边全部都是沙滩。是细节特征决定整体特征,还是反过来整体特征决定细节特征这个问题目前还不明了,但是,两者存在一定关系的事实已经是明确的了。

Mandelbrot 证明了分形具有这种尺度大小不变性的特征,称之为尺度法则。

★ 2. 分形维数

分形维数是将分形进行定量表示的一种度量。这个用来表示物体形状复杂度的尺度在分析问题时时屡屡被用到。当分形维数比较大的时候,表明对象的形状比较复杂。这个值与我们所习惯的欧几里得几何学中所接触到的二维、三维这种整数维不相同,它可以是 1.8 维,2.4 维这种小数维数。分形维数的定义,在参考文献[2]中有详细的介绍。这里,以 Koch 曲线为例,介绍求分形维数的具体方法。

Koch 曲线的生成,可以用图 6.2 所示的面缩小变换极限法,也可以用图 6.3 所示的线段缩小变换极限法。



图 6.2 Koch 曲线的生成方法 1



图 6.3 Koch 曲线的生成方法 2

我们来分析面积极限。因为进行一次缩小变换之后,可以分成两个面积为原来面积 $1/3$ 的三角形,所以,经过 n 次缩小变换后的面积 S_n ,可由式(6.1)给出,其极限为 0。

$$S_n = (2/3)^n S_0 \quad (6.1)$$

下面我们来分析线段的极限。因为进行一次缩小变换后,可以分

成四个长度为原来的 $1/3$ 长度的线段,所以经过 n 次缩小变换后的线段长度 L_n ,可由式(6.2)给出,其极限为 ∞ 。

$$L_n = (4/3)^n L_0 \quad (6.2)$$

这样,面积(二维)的极限为0,线段长度(一维)极限为 ∞ ,所以可以分析到,在一维和二维之间存在收敛的测度。下面,就这个测度(分形维数)的定义进行论述。

假设对象图形是由相似比为 r 的 N 个段(segment)组成。这时,存在满足式(6.3)的 D 。

$$N_r^D = 1 \quad (6.3)$$

求解式(6.3),则 D 可由下式给出:

$$D = \log N / \log(1/r) \quad (6.4)$$

由式(6.4)得到的 D 的值就是分形维数。用这个式子来计算前面给出的 Koch 曲线的分形维数。Koch 曲线是由 4 个相似比为 $1/3$ 的线段构成的,所以其分形维数为 1.26。

这样,便可简单地计算出按照某种规则生成的分形图形的分形维数。另外,所有在现实中的物体形状的分形维数,可以按照下面的方式求出。例如求里亚式海岸中有名的三陆海岸的分形维数。二次曲线段的分形维数可按照以下的方法来测定。

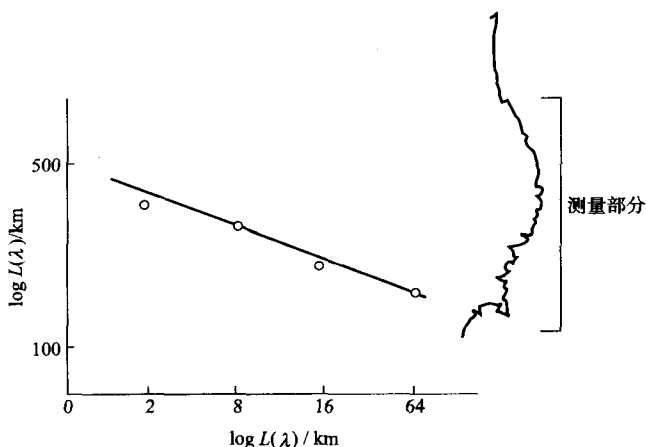
首先,用间隔为 λ 的标尺测得对象图形的长度为 $L(\lambda)$ 。之后不断地减小 λ 来进行反复的测量,显然, $L(\lambda)$ 会逐渐增大。

这个例子用图形来表示,如图 6.4 所示。这是测量从日本的宫古到石卷之间的三陆海岸的距离时的图形。从图中可知, $\log L(\lambda)$ 与 $L(\lambda)$ 成正比; $L(\lambda)$ 可由下式计算得出:

$$L(\lambda) = A\lambda^{1-D}, A, D \text{ 为常数} \quad (6.5)$$

首先,从求得的图形的斜率,计算 $1-D$ 的值,这个 D 值就是对象图形的分形维数。由此计算得到的图 6.4 所示的三陆海岸的分形维数为 1.28。由此可知,该海岸有与 Koch 曲线同等的复杂度。

对具有自相似性结构的图形,其 $\log L(\lambda)$ 与 $L(\lambda)$ 的关系和这个例子一样,是直线关系。而对于简单几何图形的圆,随着 λ 的减小, $L(\lambda)$ 快速收敛到某一个确定的值,因此, $\log L(\lambda)$ 与 $L(\lambda)$ 的图形不具有直线关系。换句话说,圆不是一个分形图形。

图 6.4 三陆海岸的 $\log \lambda - \log L(\lambda)$ 图形

★ 3. 身边的分形

分形理论不仅局限于计算机图形学领域,它还可以用来描述各种现象。在我们周围的环境中,具有分形结构的東西非常多。除了前面介绍的海岸线之外,天空中堆积的云、烟囱中冒出来的烟等都具有分形结构。还有花椰菜,大的花椰菜是由许多小的花椰菜构成的,小朵的花椰菜中还有更小的花椰菜,这也是一个非常有趣的具有分形结构的物质。

下面,将给出除了这种形状以外的,分形理论的应用实例。

(1) 分叉现象 对于像树木、河流、血管等物体所具有的分叉现象,用分形理论进行研究的例子也不少^[4]。例如人支气管的分形维数大约是 3,动脉的分形维数大约是 2.7。这个值越接近 3 分支越密。

对于支气管,为了高效率地吸取氧气,就需要具有这种高密度的分支结构。这种分形维数的理想值是 3,因为细胞的大小是有极限的,所以实际值比 3 略小。此外,因为肺细胞不断的分裂而成长,所以其成长过程也具有自相似性。

(2) DLA 所谓的 DLA(Diffusion Limited Aggregation),是为了说明分形成长提出来的模型。将其翻译出来,就是被扩散所支配的凝聚,是指可以用布朗运动代表的随机运动下的凝聚过程。例如在粒子成长的过程中,附着在某个结晶体上成长时,实际上,一旦附着上之

后,就会趋向于原封不动地固定在上面的非平衡过程。身边还可以看到的例子是,电解液中成长金属的解析物(金属膜)。这类现象的仿真在计算机上可以非常简单地进行^[5]。

对于可以生成 DLA 的模式,其生成过程是不相同的。但是,称为 Lichtenberg 现象的放电模式,与向黏性很强的液体(例如甘油)中强制注入黏性弱的流体(例如空气)时的模式非常相似。

(3) 股票价格的变动 股票价格变动的预测是金融界中的一个重要的研究课题。用解析方法来预测是非常困难的。从股票价格变动的图形来看,其上下波动非常剧烈,看起来是完全的随机曲线。但是,从统计的角度来看,可以说存在着一定的规律。

Mandelbrot 所发现的规则,是与股票价格变动有关的尺度法则^[2]。也就是说,价格的变动不依赖于时间间隔。某一商品的价格在一日之内、一周之内、一个月之内、一年之内的变化都具有相同的分布。商品都会经历景气好坏的规律,这是商品的本质。这也应了历史在不断重复的格言。

除了以上所给出的例子之外,分形理论还广泛应用在湍流模型、图像分析、降雨区域图等领域中。

★ 4. Mandelbrot 集合与 Julia 集合

在介绍分形的书中,大多数场合都会介绍 Mandelbrot 集合与 Julia 集合的例子,两个集合的生成都是源于下式给出的复数 Z_n 的迭代式。

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + C \quad (6.6)$$

式中,取 $Z_0 = 0$,当 $n \rightarrow \infty$ 时,不会导致 $Z_n \rightarrow \infty$ 的所有 C 所构成的集合称为 **Mandelbrot 集合**。

式(6.6)中, C 取固定值,当 $n \rightarrow \infty$ 时,不会导致 $Z_n \rightarrow \infty$ 的所有初始值 Z_0 所构成的集合称为 **Julia 集合**。

实现的方法非常简单,是复数迭代式在满足各集合条件下重复求解的过程。但是如果不对算法进行优化的话,要对不同的迭代次数赋以不同的颜色,会需要非常庞大的计算时间,图 6.5 是生成 Mandelbrot 集合算法的一个示例。

计算机的计算结果如彩图 6.1 所示,是一个非常不可思议的美丽

6.2 所谓的分形

```
define Z=X+iY ;  
C=A+iB ;  
for each pixel (px,py){  
    count=0 ;  
    X=Y=0 ;  
    A=px ;  
    B=py ;  
    do{  
        Z=Z2+C ;  
        count=count+1 ;  
    }while(Z<M & count>N);  
    choose pixel color with count ;  
}  
  
M: Z的大小的阈值  
N: 重复循环数的阈值
```

图 6.5 Mandelbrot 集合的生成方法

图案。这个图案与太阳的日珥(prominence)非常相似,并且具有自相似性,无论放大多少,它还是一个日珥图形。

★ 5. IFS

下面,我们对在计算机图形学领域中的迭代函数系统(IFS: Iterated Function System)的应用情况进行简单的论述。IFS 方法^[6,7],是对某个图像,用其缩小之后的图像反复拼贴来近似的方法。用艺术的术语来说,就是用粘贴画(collage)手法制作作品的过程。

这种方法可以用式(6.7)表示的缩小变换 w 的组合来表示。

$$w \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

例如彩图 6.2 所示的图形可用表 6.1 所示的参数生成。制作方法是将某个图形(例如长方形)以上的参数进行缩小变换,将变换后得到的各个图形,再用缩小变换进行不断的重复。

下面,求彩图 6.2 的压缩率。如果表 6.1 的每个参数用 4 字节长的小数来表示的话,其编码量为 $4(\text{组}) \times 6(\text{参数个数}) \times 4(\text{字节数}) \times 8(\text{位数}) = 768\text{bit}$ 。对于 1000×1000 的二值图像,其压缩率为 $(1000 \times 1000) / 768 \approx 1300$ 倍。显然,这个值依赖于图像的大小,可以实现大的压缩率。

表 6.1 羊齿叶的 IFS 参数

a	b	c	d	e	f
0.849	0.037	-0.037	0.849	0.0	0.160
0.197	-0.257	0.226	0.223	0.0	0.160
-0.150	0.283	0.260	0.238	0.0	0.044
0.000	0.000	0.000	0.160	0.0	0.000

接下来,计算图像解压恢复时所需要重复计算的次数。以 500×300 的长方形为初始图形,将这个长方形收缩到 1 个像素为止,所需要的重复次数 n 是实现第一缩小率的最少的变换(表 6.1 的 0.85),可由下式求出:

$$500 \times 0.85^n = 1 \quad (6.8)$$

计算得到 $n=39$ 。因此,得到的长方形的个数 M 可由式(6.9)求出。

$$M = 1 + 4 + 4^2 + 4^3 + \cdots + 4^n = (4^{n+1} - 1) / 3 \approx 10^{24} \quad (6.9)$$

即使使用每秒钟可以获得 100 万个长方形的高性能图形工作站,也需要花费 10^{11} 年的时间。显然,这是一个不实用的方法。在实际中可使用的已经实用化的算法,请参阅参考文献。

用这种方法实现图像的编码,也就是说,从给定的图像中求出表 6.1 所示的参数,并进行编码的方法,目前已有许多的研究报告发表^[8,9]。

虽然这类方法在压缩时需要非常庞大的计算量,但是,该类方法打破了经典压缩算法的常规思路,是一类可实现极高压缩率的方法。

6.3 计算机图形学中的分形

前一节论述了分形的基础及其相关的技术,本节将介绍分形在计算机图形学中的应用。

★ 1. 为什么分形是一个重要的理论

为什么在计算机图形学领域,分形成了非常重要的内容。用一个关键词来概括,可以说“分形是一台魔法编织机”。如果将基于分形理论的算法用程序来实现,则从程序结构的简单性方面无法理解其中的玄机。但是该程序却可以产生出非常复杂的,并且是数据量非常庞大

的数据。操纵垂线的程序,以及在这个程序中加入了横线的参数,将这些线在编织机上进行复杂的编织,在简单的迭代操作中,制成了美丽的编织物。换句话说,使用了分形技术,就省略了非常繁琐的单个数据的输入,可以通过程序自动地生成具有美丽形状的模式。

一直以来,制作 CG 图像的过程中的瓶颈问题是数据的输入。对于不得不介入人工的处理过程,这个环节是最花费时间的。同时,对于这项超负荷的工作来说,人会觉得非常麻烦。例如将山岳的每个细节的数据都输入的话,几乎是不可能的事情。但是,如果用分形理论的话,这种具有庞大数据量的数据可以由计算机自动生成。

然而,并不是所有的东西都可以用分形来生成。如机械零件、工业制品这种原本是人工制造出来的东西,用实体模型或者是表面模型这类经典的 CAD 系统来实现数据的输入是非常有效的。但是,像山、云、植物这种自然物体的形状太过复杂,所以要将细节部分的数据全都输入的话几乎是不可能实现的。虽然说用 CAD 系统没有做不了的东西,但是需要输入庞大的数据量,并且用这些数据生成自然形状的物体的操作几乎是不可能实现的。

这样,分形在表现自然形状的建模方面,便发挥出独特的威力。但是,要注意一点,这种建模的方式不是对自然形状的忠实描述,而是对自然物体的一种近似的建模方法。对于自然物体形状的形成,不明确的地方很多,所以要对其确立一个明确的,具有通用性的模型是非常困难的。因此,目前的现状是,对应于各种对象,采用分别建模的方式。其中分形理论的应用是其共同的设计思想。

★ 2. fBm 与中心点变位法

Mandelbrot 最初将分形理论可视化的对象是用计算机生成了一个虚构的地形。在制作这个地形图时所采用的技术称为 fBm(fractional Brownian motion),这是一个以分形维数为参数的布朗运动的扩展模型^[2]。

他们注意到山岳的垂直断面的形状与布朗运动的轨迹相似,其形状可以用布朗运动产生的起伏来表示。在这个方法中,根据分形维数参数的变化,可以表示各种不同起伏的山岳。

比 fBm 方法的计算效率更高的具有通用性的中心点变位法是由

A. Fouriner 提出来的^[10],中心点变位方法不是数学意义上的严密的分形方法,但是由于该方法具有通用性,并且从其结果来判断,可以作为一种分形的近似方法,所以得到了广泛的应用。该方法中,应用了概率模型近似的方法,将给定的初始形状进行递归分割,最后形成山岳的形状。

以图 6.6 为例,对中心点变位方法进行简单的说明。假设作为分割对象的初始图形为 $\triangle ABC$ 。这时, $\triangle ABC$ 的各边的中点均以某个变量 V 升高,获得了四个新的小三角形 $\triangle ADF$, $\triangle BED$, $\triangle CFE$, $\triangle DEF$ 。如果将这个分割进行重复递归的话,就得到了山脉的近似形状。因此,如果山岳的大致形状用三角形的面素来定义的话,则对每个三角形用中心点变位方法进行递归分割,就可以生成彩图 6.3 所示的山岳的形状。

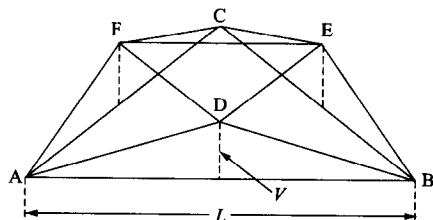


图 6.6 中心点变位法

★ 3. 分形图形及其生成规则

在生成一个分形图形时,最基本的是对某个初始形状进行递归分解。利用下面给出的生成规则,可以比较简单地实现一个分形图形。

首先,以一个简单的例子对生成规则进行说明。

- 初始状态: b
- 生成规则: $a \rightarrow ab, b \rightarrow a$

设给定的初始状态为文字 b ,服从上面的生成规则,依次实现如下所示的文字序列的变化,生成的文字序列具有自相似性,服从生成规则的文字序列的生成过程等价于对某个初始形状的递归分割,

$$b \rightarrow a \rightarrow ab \rightarrow aba \rightarrow abaab \rightarrow \dots$$

下面我们按照这样的生成规则,来尝试生成一个分形图形,因为只用文字序列是无法描述图形的,所以,需要添加线段的长度,转折的

角度等几何信息来进行描述。在这里所使用的描述方法中,因为所用的是命名图形,所以各个符号具有以下的含义。

- F : 下笔的状态,按照一定的距离前进。
- $+$: 前进方向的右侧以一定的角度 θ 进行方向转换。
- $-$: 前进方向的左侧以一定的角度 θ 进行方向转换。
- $[$: 将当前的命名状态放入堆栈中。
- $]$: 将命名状态从堆栈中取出。

用这些编码符号来定义初始状态 I 以及生成规则 P 。根据所生成的文字序列,就可以得到命名图。例如图 6.1 的 Koch 曲线可以按照以下的规则来生成。

- $\theta: 60^\circ$
- $I: F$
- $P: F \rightarrow F - F + + F - F$

彩图 6.4 所示的植物图形具有以下的参数。

- $\theta: 22.5^\circ$
- $I: F$
- $P: F \rightarrow FF + [+F - F - F] - [-F + F + F]$

通过这些例子,读者可以自己设计生成规则,来享受分形图形带来的快乐和惊喜。因为从生成规则很难想像会生成什么样的图形,所以实验的关键点的考虑,是一非常有趣的问题。图 6.7 是根据生成规则所生成的分形图形的示例。

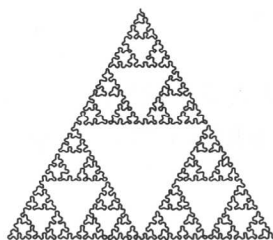
☆ 4. 粒子系统

与分形没有直接关系的,如火、烟、爆炸、瀑布等这种边界模糊不清的模糊对象的表示模型是称为粒子系统的模型^[11]。这种方法与经典的方法相比,不是用多边形等几何要素来表示的,而是用称为粒子 (particle) 的目标量来表示。例如要对火焰建模时,粒子的密度越高,则亮度越高。由此可以表示火焰独有的效果。粒子系统不仅可以表示火焰,而且还是对植物进行建模的有效方法。

在前面提到的《星际旅行 II》的影片中,就是用粒子系统实现了对火焰的描述。这里所使用的粒子系统中,给定了各个粒子的初始速度,以及生存期间(直到火焰燃尽)等,在程序的设计中采用的方法是,

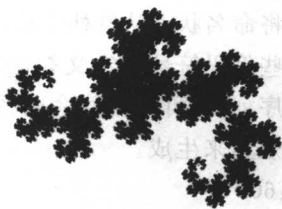
在投下炸弹的地点,以同心圆的形状生成下一批粒子。所以在火燃起的场景中,大约使用了 750 000 以上的粒子进行描述。

以上,对分形理论的基础及其应用进行了论述,Mandelbrot 提出了一个观点,就是今后在高校的微积分教学中,应该加入分形理论作为必修的科目。



- $\theta : 60^\circ$
- $I : YF$
- $P : XF \rightarrow YF + XF + YF$
- $P : YF \rightarrow XF - YF - XF$

(a) shellpinsky的波状花边



- $\theta : 90^\circ$
- $I : FA$
- $P : A \rightarrow A + BF +$
- $P : B \rightarrow -FA - B$

(c) Dragon曲线



- $\theta : 60^\circ$

- $I : XF$

- $P : XF \rightarrow XF + YF ++ YF - XF -- XF XF - YF +$

- $P : YF \rightarrow -XF + YF YF ++ YF + XF -- XF - YF$

(b) COSPAR岛



- $\theta : 90^\circ$

- $I : F + F + F + F$

- $P : F \rightarrow FF + F + F + F + F + F - F$

(d) 念珠曲线

图 6.7 分形图形的示例

所有在计算机图形学领域中所需要的研究项目,在参考书籍中有详细的介绍,请读者参阅相关的参考文献。

分形理论本身还有许多需要研究的内容,其应用领域也还将继续拓展。

参考文献

- [1] Paramount : Star Trek II ; The Wrath of Khan (film) (1984)
- [2] B. B. Mandelbrot : The Fractal Geometry of Nature, Freeman, San Francisco (1982)
- [3] H.-O. Peitgen, and P. H. Richter : The Beauty of Fractals, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1986)
- [4] 戸川達夫 : “血管の分岐”, 数理科学, 221, pp. 21-27 (1981)
- [5] タマス・ヴィチェック : フラクタル成長現象, 朝倉書店 (1990)
- [6] S. Demko, et al. : “Construction of Fractal Objects with Iterated Function Systems”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 19, 3, pp. 271-278 (1985)
- [7] M. F. Barnsley, et al. : “Harnessing Chaos for Image Synthesis”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 22, 4, pp. 131-140 (1988)
- [8] M. F. Barnsley : Fractal Everywhere, Academic Press (1988)
- [9] A. E. Jacquin : “Image Coding Based on a Fractal Theory of Iterated Contractive Image Transformations”, IEEE Trans. of Image Proc., 1, 1, pp. 18- 32 (1992)
- [10] A. Fouriner, et al. : “Computer Rendering of Stochastic Models”, Commun. ACM, 25, 6, pp. 371-384 (1982)
- [11] W. T. Reeves : “Particle System-A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 17, 3, pp. 359-376 (1983)

第 7 章

自然物体的生成方法

本章就自然物体,即山岳、树木、云、火、烟、水流、岩石等基于计算机图形学技术的表示方法进行论述。自然物体的计算机图形学表示方法可以说就是对其形状、动作、颜色进行建模与造型。与人工制作物体的计算机图形的生成最大的不同点是,其形状、动作、颜色都是由算法生成的。这个研究领域的中心话题就是如何自动地对形状、动作、颜色进行建模。目前,已经有许多研究人员在这方面进行了深入的研究。前一章,对分形方法实现的具体例子进行了说明。本章首先对自然物体的计算机图形学的表示方法进行论述,接下来对目前研究最多的自然物体的表示方法的实例进行介绍。

7.1 自然物体的计算机图形学表示方法

如表 7.1 所示,在计算机图形学中处理的对象,大致可以分为机械零件、建筑物等人工制造的物体和自然界中存在的山、云、岩石等无机物,以及花、树木、人等生物。其中,人工制造的物体,因为形状是确定的,所以其建模和造型相对比较容易,用计算机生成这样的图像也比较容易,用目前三维计算机图形学的方法就可以完成。但是,对于无机物、生物等自然物体,如果以确定的模型进行建模的话,就会有人造的感觉而失去其自然的特性,所以在生成写实性图像时,就很不容易。然而,在前一章中所介绍的分形理论的应用开始,将自然物体以及自然现象作为自计算机图形学的研究对象,从 20 世纪 70 年代后期开始,这个方面的研究得到了飞速的发展。因为这不仅具有实用意

义,而且从形态科学的观点来看,也意义深刻。用计算机实现对“自然”景观的描述,向大自然所特有的神秘感发起挑战的欲望,是最重要的研究动力。

表 7.1 主要的计算机图形学的处理对象

非生物	固体	人造结构物体	桥梁、建筑物、汽车	
		刚性物体	木纹、岩石、山岳形状、金属	
		人造柔性物体	衣服布料、窗帘、纸	
	流体	管流	河流、血管	
		表面波	海、浪、涟漪	
	自然现象	气象	大雾、烟雾、云	
		其他	烟、喷火、爆炸、火灾	
生物	植物	树木	森林、树(桦树、银杏、樱花)	
		花草	草、花	
	动物	人类	脸	脸上的表情
			脸以外	头发、皮肤
		动物	定形动物	鱼,鸟,马
			不定形动物	阿米巴细菌,布朗运动

利用计算机图形学的方法实现对自然物体、自然现象的写实性描述,将在包括如下所示的多个应用领域中展开:

- ① 各种建设规划中的景观设计,用作评价的景观仿真;
- ② 飞行仿真,驾车仿真中的景观生成;
- ③ 电影的特技,CG 演员;
- ④ CG 庭院,CG 植物园,CG 动物园;
- ⑤ CAI,CG 讲师;
- ⑥ 形态的研究;

⋮

①和②可以表现在不同的季节和气候条件下的仿真。②和③的技术可以用来制作游戏。用③的技术可以表现虚拟的山岳地形、植物、动物,以及 CG 马、CG 士兵的战争场面。对所要进攻的城,可以用火烧很多次。CG 演员则可以在剧目中登场演出。用④的方法,可以使我们与所有已经灭绝的动物和植物接触。此外,我们可以非常接近那些饲养、栽培比较困难的,或者比较危险的动植物。在非常窄小的

房间里或者是宇宙飞船里,都可以使人们感到好像在很大的庭院里散步。用⑤的技术,可以学习动物的饲养方法,还可以相互接触,可以练习CG盆栽、CG插花技术。当然,也可以学习景观的设计。用⑥的技术,根据计算机图形学方法所进行的形态仿真,可以加速对形成机理的认识。

计算机图形学的研究对象中,所谓的自然物体以及自然现象是指表7.1所示的分类方法中,除人工设计制造物体栏中所列的对象以外的所有物体。也就是说,即使是人造物,如布这种复杂变形的东西,也可以作为自然物体用计算机图形学技术来进行处理。在这些自然物体、自然现象中的一种特殊的对象——人的描述与表现,将在下一章进行介绍。

在计算机图形学中,与表现自然物,自然现象有关的技术,可以按如下方式进行分类:

① 建模

- 形状的建模
 - 基本形状的建模
 - 细微结构的建模
- 颜色的建模
 - 色彩分布的建模
 - 色彩变化的建模
- 动作的建模
 - 运动的建模
 - 行动的建模
 - 表情的建模

② 造型

- 面消隐方法
- 描影法
 - 反射模型

在这些技术中质感(纹理)的表现是由细微结构的建模、色彩分布的建模、反射模型的建立来实现的。此外,在表现火、烟、水流、果冻等对象时,还要注意这类对象的运动体现了它的形态和质感(素材)。

与人造物不同的是,自然物体和自然现象的形态、动作、颜色的建

模是由算法自动生成的,也就是说,可以进行仿真的东西很多。这个研究领域的魅力就在于此。下面,就广泛研究的典型的自然物体的表示,逐个对其具有代表性的计算机图形学方法进行介绍。

7.2 山岳的表示

在表示山岳时,需要以下的表示方法:

- ① 山岳形状的表示方法
- ② 山岳表面的表示方法
 - 地表面、森林的细微结构的表示方法
 - 植被、积雪、融雪等色彩分布的表示方法
 - 红叶等色彩变化的表示方法

② 的方法将在第 7.3 节和第 7.4 节中加以说明,这里,主要对①的方法进行介绍。当然,我们知道,所要描述的山岳包括了实际中存在的山岳和虚拟山岳两类,这里主要介绍虚拟山岳形状的表示方法。对于实际存在的山岳形状,可以根据国土数字信息、地图的标高值等进行表示,山岳表面可以用航拍照片进行匹配。

目前为止,所提出的虚拟山岳形状的生成方法,大致分为以分形方法为代表的概率建模方法和根据山岳的形成机理构成的生成方法^[1~3]。这些方法都是用很少的一点点输入数据,就可自动生成自然的虚拟山岳。这里,就其中的具有代表性的方法进行介绍。

★ 1. 分形方法

用分形方法作为山岳形状的生成方法,在前一章中已经介绍了 fBm 方法以及中心点变位方法。其中,中心点变位方法的应用最为广泛,因为该方法具有通用性。将中心点变位法进行改进的算法,是根据形状的定义,用等高线的方法^[4],可以防止中心点变位方法当中具有的不自然的折线生成的缺点等^[5,6],这方面有许多的研究报告发表。

用分形方法生成的山岳、地形,也可以用巨大数据量的三角形集合来描述。因此,对于用光线跟踪进行造型的场合,用某种数据确认方法,可以提高计算效率。J. T. Kajiya 对用分形面递归生成山岳的方法进行改进,在每个分割层上,进行数据确认,对于找不到光线交点的

数据,在下一分割层上计算光线的交点^[7]。

用这种分形方法生成的地形,可以组成了 SF 影片中的场景^[8]。

★ 2. 考虑生成机理的方法

以生成山脊线、山谷线的山岳形状为目的的方法,是用概率模型,以某种谱合成方法来实现的方法。对由于侵蚀作用而形成的山岳的仿真,与水流系统的生成相似,用分形方法来表现山岳地形的侵蚀、风化作用而导致的变形,可以得到更加自然的山岳地形。

这里,就仅输入表示待描述山岳概貌的山脊线,通过递归生成细节上的山脊线的方式,来自动生成具有清晰的山脊线的山岳地形的山脊线递归生成方法进行论述^[2]。如果给定了某个侵蚀段的山岳地形的话,则在下一段上生成的细节上的山脊线,是向其地形的谷底方向,如水流般流动的方式构成一种自然的地形。采用这种方法,因为待处理山岳地形的概貌已经由大致的山脊线的形状确定了,所以形状信息的控制是比较容易的。因为形状的生成是以山脊线为单位来进行的,所以对自然界中的侵蚀作用的仿真,具有快速性的特点。这个方法可以概略地表示如下(参见图 7.1):

第 0 步:将给定的山脊线扩展到整个山野,生成倾斜比较平缓的初始山岳地形。

第 1 步:按照给定的次数将下面的第 1-1 步到第 1-3 步进行循环操作。

第 1-1 步:跟踪在山岳表面均匀配置的“水滴”的流向,多个水滴通过的地方定义为“谷底”。

第 1-2 步:因为山脊线是沿着水滴流动的方向形成的,所以只在谷底出现山脊线的端点,由此定义新的山脊线。这时,在已有山的交点上,加入已有山脊线的运动形态。

第 1-3 步:将前面所确定的山脊线扩展到比前面稍微陡峭倾斜的山野中,生成新的山岳地形。

第 2 步:将山岳地形进行平滑化处理,获得比较平滑的表面。

彩图 7.1 是按这种方法所得到的山岳形状的 CG 图像的示例。

7.2 山岳的表示

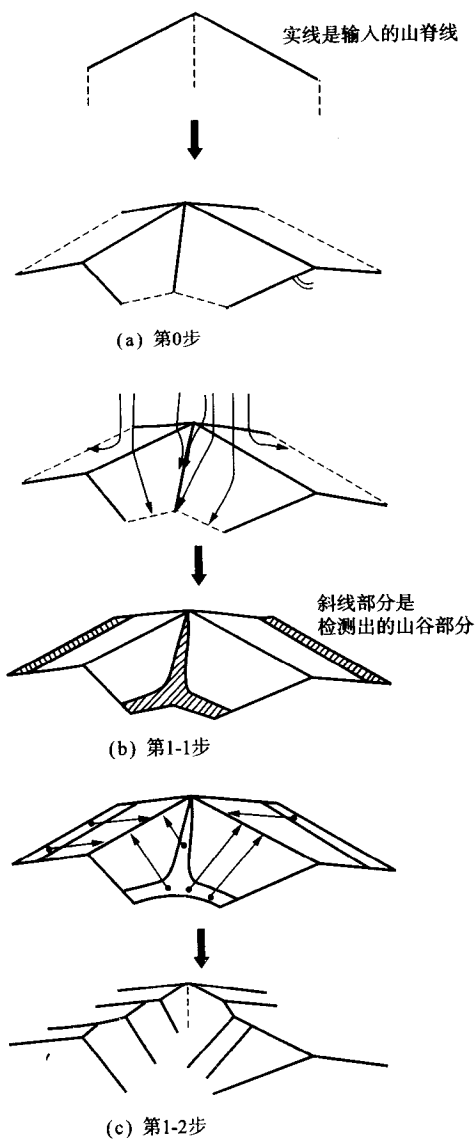


图 7.1 山脊线的生长模型

7.3 树木的表示

在表示树木时,需要以下的方法^[9~12]:

- ① 枝干的骨骼形状的表达方法;
- ② 枝干粗细的表达方法;
- ③ 树皮的表达方法;
- ④ 树叶的表达方法;
- ⑤ 以上几种形状及色彩的季节变化,年轮变化的表达方法;
- ⑥ 树木运动(随风摇动)的表达方法;
- ⑦ 植被表示方法。

目前,树木、花草的表示方法,一般可以大致分为写实图像或者是生成纹理的匹配方法,以及由形状定义法生成三维几何模型的方法。前者对应的是①~④的描述方法,后者对应的是①的描述方法。这里就前者的方法,以及属于后者的分形方法及生成模型进行论述。⑥和⑦的方法,将在另外的章节中介绍。

★ 1. 纹理匹配方法

用纹理匹配方法描述树木的示例,如图 7.2 所示,将去除背景之后的树木的写实图像,向一个透明平面上投影,与构成景观的其他模型一起进行配置,就是这里的造型处理了。透明平面通常是朝着视线方向放置的。在这个简单的方法中,与树木相同的面,通常是指朝着视点的面。随着视点的移动,会出现动画效果等不自然的现象,还有不能从树上观察的缺点等。但是对于前者,如果所描述的是一个远景,则问题不大;对于后者,通过采用多个透明平面的方法也可以回避^[13]。因为这是一个非三维形状模型,所以描述树木的枝叶晃动等是非常困难的。此外,因为写实图像有限的分辨率,存在放大时模糊的难点。不过,目前已经开发出了逼真度高,并且计算代价小的景观仿真实用方法。

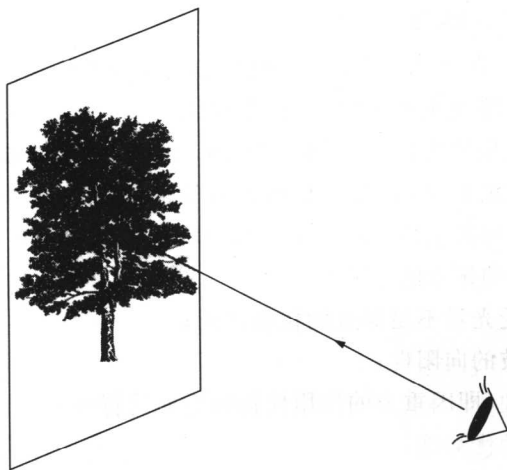


图 7.2 写实图像向透明平面上的影射

★ 2. 分形方法

A. Lindenmayer 发表的 L-系统成为与植物的生长相关的研究的基础^[14]。这种方法是将植物生长的规律,用语法方式描述的生长规则来描述,并且添加分枝的角度、分枝的长度等几何信息,使表示植物成为可能。与生长规则相关的图形已经在前一章中介绍了。

以 L-系统为基础的植物生长方法,有多个研究报告发表。例如青野等人的研究,是将植物的分枝用若干个几何模型来表示,采用分枝分开的角度,以及分叉的比例等多种参数,描述和表示树木的生长^[15]。A. R. Smith 应用 L-系统,提出了称为 Graftal 的语法模型^[16]。此外, P. E. Oppenheimer 提出了对植物这种具有分叉现象的物体,用分形理论进行建模^[17]的方法。在这个方法中,用称为遗传参数的数值参数,来控制植物的几何信息和拓扑信息。并且有研究报告提出了应考虑在树枝在生长的过程中受光量影响的模型^[18]。

P. Prusinkiewicz 等人根据控制植物生长机理,对其进行仿真^[19]。这类方法中,植物结构的建模不仅仅是对树枝进行建模,还包括对树叶的生长,以及开花的建模。

用这种生长植物,不仅可以对都市景观进行仿真,而且也可以对植物的生长过程进行论证性的实验^[20]。

☆ 3. 生长模型

目前,已发表^[9,10]的多个介绍生长模型的研究成果可以大致分为树木生长与环境无关型的方法,以及树木生长与环境有关型的方法。在与环境无关型的方法中,树枝的摇动,主要是通过控制树的主干分叉角度和树枝的长度,以及分枝的频度等来获得树木的生长模型的,所获得的树形与其生长环境无关。与环境有关型的生长模型,则需要考虑如下所示的树木的性质^[12]:

- ① 因为受光量不足导致的树枝枯死;
- ② 生长枝的向阳性;
- ③ 屈地性(即因重力的作用使树枝弯曲的特性);
- ④ 顶芽的优势性;
- ⑤ 休眠芽的萌发;
- ⑥ 分枝的树干化。

根据这些模型,如下所示,可以生成非常自然的树枝的摇动。

① 虽然树枝很密集,但是为了彼此都避免枯死,仿佛互相交换信息,相互努力,向空间拓展形成树冠;

- ② 求出在光照下已经长成的,如轨迹般的树枝下垂的形状;
- ③ 从已经很老的树干上发出新芽的树形的复杂化;
- ④ 确定分枝后,因多个新芽萌发而形成的新的树冠;
- ⑤ 在宽叶树上也可以看到的类似树干的大的分叉树枝;
- ⑥ 只在针叶树上可以看到的树干化树枝。

如图 7.3 所示,这里给出了一个具有①和②性质的树木生长的模型的仿真示例。图 7.3(a)是只对规则的分枝进行重复的,简单的二分作用模型所得到的不同的树形。在这个分枝模型中,如果对具有①~⑥性质的分枝进行迭代操作的话,则可以实现②~⑥的自然的树枝生长。图 7.3(b)是当落在叶子上的受光量小于某个阈值的分枝枯死后,所生长起来的树形。这个模型中,将在树枝上的众多树叶近似成一个球,计算每个球从天空获得的光量(光的强度在通过其他球时会衰减)。按照一定的大小间隙来给定阈值。由于不断有分枝枯死,所以在成长过程中,分枝的长度各不相同。再加上所谓的向阳性,即朝着比较强的光的方向修正分枝生长的方向,如图 7.3(c)所示,增加生存

下来的分枝的个数,树冠越来越圆。受光量的计算,可用将天空方向设为深度方向的深度缓冲方法,或者是使用三维光栅空间(体素空间)和 3DDDA 的造型处理方法。

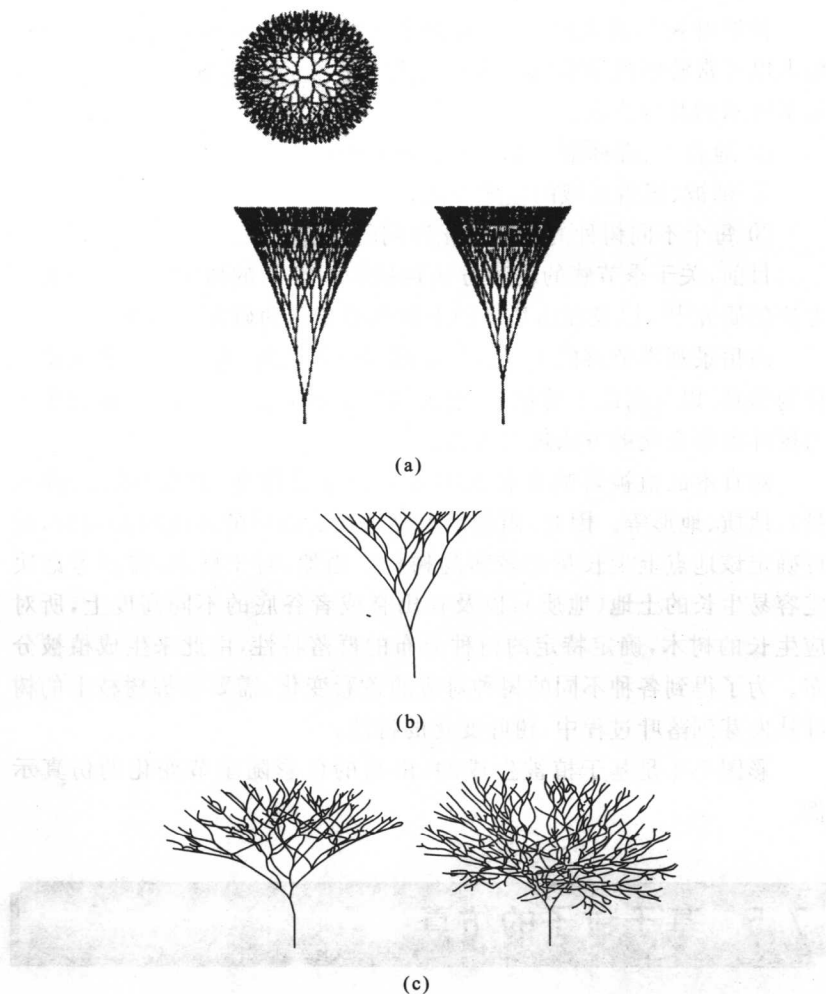


图 7.3 基于生长模型的生长示例

彩图 7.2 和彩图 7.3 就是用这种生长模型获得的生长后的树木的 CG 图像。

7.4 山岳、树木的季节感的表示

被宽叶树林覆盖的山岳,在四个不同的季节呈现出不同的景色,给人以非常鲜明的季节感。这种充满季节感的山岳景观的表示,需要如下所示的几种方法:

- ① 地表面、森林细微结构的表示方法;
- ② 植被、积雪区域的生成方法;
- ③ 每个不同树种的色彩变化序列的确定方法。

目前,关于季节感的表示方法包括积雪纹理的研究^[21]、红叶表示方法的研究^[11],以及在山岳层面上的色彩变化的研究^[22]等等。

山岳景观季节感的仿真包括嫩绿、深绿、红叶、落叶等树木色彩变化的仿真,以及高山上的积雪、融雪的仿真等方法。这里,就植被生成与树叶色彩变化的方法进行论述。

对日本的植被影响比较大的主要因素是纬度、高度(温度、降水量)、地质、地形等。因此,当给定需要仿真的山岳的纬度和高度时,就可确定该地点上生长量比较多的树种。当然,对于树木,需要考虑决定容易生长的土地(地质),以及在山脊或者谷底的不同高度上,所对应生长的树木,确定特定的树种分布的群落特性,由此来生成植被分布。为了得到各种不同的树种对应的色彩变化,需要掌握树枝上的树叶从发芽到落叶过程中,树叶变化的特性。

彩图 7.4 是基于植被生成的,山岳的色彩随季节变化的仿真示例。

7.5 基于粒子的仿真

许多的自然物体、自然现象可以用基于粒子的仿真方法来表示^[22]。前面所介绍的树木的生长模型,如果将生长树枝的顶端看成是粒子的话,则可以用粒子进行运动仿真。

单个粒子的运动方程如下所示:

$$Ma(t) = f(t)$$

式中, M 为质量, $a(t)$ 为加速度, 即 $dv(t)/dt = d^2x(t)/dt^2$, 其中, $x(t)$ 为时刻 t 上的位置, $v(t)$ 为速度 $dx(t)/dt$, $f(t)$ 为时刻 t 上的运动力。

对于这个微分方程式, 用最简单的数值计算方法, 即尤拉方法获得的差分方程为

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \Delta t \cdot f(t) / M$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot v(t)$$

目前所提出的多个自然物体、自然现象的基于粒子的仿真方法, 可以认为是以求解粒子相关的运动方程为主的方法。

对于自然物体、自然现象的基于粒子的仿真方法, 从其适用性的观点来看, 可以分为以下几种:

① 用粒子的运动或轨迹进行仿真估计出的对象。其中有包括人类在内的动物(动物群体)的行动, 烟花的“开花”, 草木的发芽, 树木枝叶的下垂形态, 树叶、雨滴、雪花等的下落运动, 与瀑布、浪花相伴的水流, 烟的升腾, 积雪等。

② 根据粒子所在“场”的运动(如气流场)估计出的对象。其中有燃烧的火焰与不断冒出的烟, 雪花的飞舞, 纸屑的飞扬, 树叶的摇动, 强风下草、竹子、树的摇动, 布、头发、竹子等柔软物的运动, 云的形状等。

③ 无法明确估计适用性的对象。其中有树木的生长与形状, 细小裂纹的形状, 因为侵蚀作用而形成的山岳的形态, 布、头发、竹子等柔软物的形状变化与运动等。

7.6 树木摇动的表示

在树木摇动的动画片制作应用中, 对静止树木形态的表示, 以及对枝叶随着风自然摇动的形态的表示都是非常重要的。即使是没有风, 树木根据设计方案也会产生“自发性的摇动”。因此需要考虑这种基于运动学的表现方法。然而, 当风经过草原和森林, 或者是强风使整棵树发生摇动时, 相连在一起的树枝却各自发生着不同的摇动。为了对其进行表示, 需要研究如下几个方面的方法:

- ① 风(气流)的生成方法;
- ② 树木随风摇动的仿真方法。

如果有了这些方法,则可以实现具有更高的,更自然的表示能力的模型^[22,24]。特别地,可以适用于如树叶的飞扬,雪花的飞舞,火焰及烟,旗帜等柔软体的共存的景观。

从这个观点出发,将“具有平缓约束”的邻接节点构成的树结构来近似树木,对其摇动进行仿真的方法被提了出来。在这个节点模型中,用节点以及节点间相互平缓的邻接关系来表示树木的形状。每个节点都是具有质量的点,受到力的作用后,根据力的大小和方向而运动。然后,为了不使邻接节点相互靠得太近,或者离得太远,对其位置进行修正,使之保持整体的运动。

图 7.4 表示的是树木随风摇动的状态。时间前后的顺序是从左上方开始到右下方。

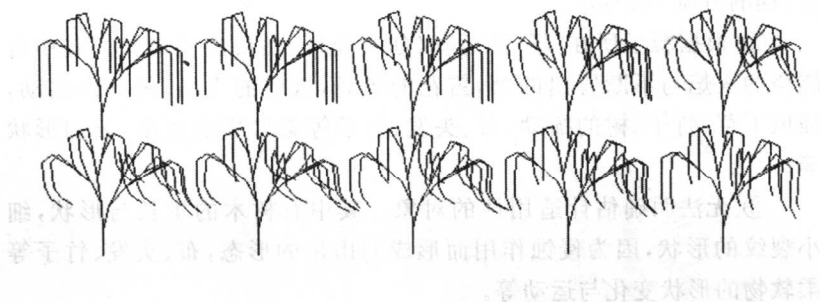


图 7.4 随风摇动的树的仿真示例

7.7 气体状物体的表示

目前,对水蒸气、大雾、云、烟,以及火焰这类气体状物体的表示方法的研究非常多^[25]。下面,具体列出了表示气体状物体所需要的方法:

- ① 气体状物体的密度分布的给定方法;
- ② 密度分布变化的给定方法(可以实现动画的表现效果);
- ③ 照明模型等气体状物体的造型方法。

这里,就气体状物体的计算机图形学的表示方法中,具有代表性的对象物,如云、火焰、烟的表示方法进行论述。

★ 1. 云的表示

对云的表示,有研究报告提出了不采用分形理论的纹理匹配方法来进行表示的方法^[26]。这种方法不仅限于云的表示,对用二次曲面近似的树木、山岳的外轮廓模型等,将其表面的傅里叶展开后的图像进行匹配,也可以实现对物体的表示。这种方法处理的对象仅限于凸形物体。可以构成紧凑的函数型的数据库。这种方法在飞行仿真中,还可以作为背景图像的生成方法,目前,已经达到了实用化的水平。

下面,我们通过 R. Voss 的研究示例^[27],对采用分形理论生成云的研究进行讨论。该方法首先是在二维平面上生成用分形函数表示的高度信息。之后计算在该高度信息下的光的衰减量,由此来表示云状物体。换句话说,就是将高度信息置换为云量(形成云的微小颗粒的量),计算光的透射、衰减量,表示出云状物体。

此外,还有研究报告提出,用表示构成云的水蒸气的浓度分布的等浓度线来给出云的定义^[28]。该方法与表示山岳形状时的等高线相同,将等浓度线用于云的形状定义,用分形理论生成浓度分布图。

彩图 6.3 就是用分形方法生成的山岳与云的示例。

★ 2. 火焰、烟的表示

下面,我们来讨论几种与表示火焰相关的内容。对蜡烛、本生灯所产生的这类火焰的仿真,可采用与产生仿真火焰相同的基于粒子的方法,对燃烧过程进行建模与造型。对燃烧纸时产生的火焰进行仿真,可采用大量涡流运动的粒子来进行描述。对复杂形态的火焰,以及蜡烛燃烧的火焰进行仿真,可采用二维 fBm 描述密度分布的方法。对燃烧势头旺盛的火焰进行仿真,可用基于特殊的混沌理论的函数的建模方法。对于烟的仿真,则可采用傅里叶级数的描述方法来进行。

目前,正在期待一种既可以对各种类型的烟、火进行仿真,又可以在各种环境下容易形成其形态和运动的方法。也就是说,上面的方法②中所要求的能力包括以下几项:

- ① 比较容易控制形态或运动的改变程度;
- ② 进行仿真时,可以自动避开锅、其他燃烧物体等障碍物;

③ 比较容易控制烟的路径;

④ 当与随风摇动的物体共存时(就好像是在同一个气流场中存在),可以对其自然的摇动进行仿真。

满足这些要求的方法之一,是在二维空间上的,基于粒子的方法,对该方法的具体说明如下所示。

该方法中,假设烟、火是“基于烟、火粒子”的气流的可视化图像。首先,在随时间变化的涡流场中,有大小不同的涡流产生,这些涡流形成了一个速度场;其次,在这个涡流场中,烟、火粒子发生运动,形成了烟或火的动作形态的仿真。粒子就是涡流场的基本示踪元素,按照一定的运动规则进行运动。然后,涡流也按照、发生、成长、衰退、移动等运动规则,形成新的涡流场。最后根据简单的热传导,实现燃烧。基于这些粒子的仿真结果,可以获得粒子移动的轨迹。CG 图像则按照下面的方法来确定,首先,将这个移动轨迹作为亮度、温度分布的中心,然后将其近旁的密度作为中心的亮度、温度,并且,随着距离的增大而逐步衰减,由此来确定亮度、温度的分布。最后,对应于不同的亮度、温度,给出颜色的比例,获得烟、火的图像。

用这种方法得到的对火的仿真示例如彩图 7.2 和彩图 7.3 所示。

7.8 水流的表示

在表示水流时,需要以下几种方法:

① 水的形状(表面)的定义方法;

② 水的运动(流动)的表示方法;

③ 关于水的造型(光的仿真)方法。

目前,关于浪和水流方面的研究,大致有以下几类^[29]。海浪的形状及运动,可以用螺旋线函数来近似;碰碎的浪花及飞溅的泡沫则采用基于粒子的方法来表示。此外,在流体力学领域中,用流体基础方程式进行数值仿真是一种非常有效的方法;在计算机图形学领域中,则用简化后的基础方程式对浪或水流进行仿真。此外,就是根据双向光线跟踪来表现浪的镜头效果。

瀑布、溪流、拍打在岸边的浪花等复杂水流的仿真,也可以用基于粒

子的方法来实现^[22]。为了表示复杂水流,其重要的水运动形态的视觉特征是水的驻留,水避开障碍物或者障碍面平稳流动,以及从空中浇下时发生的碰撞、合流、溅起水花等。因为基于粒子的方法可以对这种水的运动的视觉特征进行描述,所以提出了粒子的简单运动模型。

彩图 7.5 是将粒子看作电荷时的等电位面上所生成的“水面”的 CG 图像。

7.9 岩石的表示

在表示岩石时,需要如下所示的方法:

- ① 岩石形状的表达方法;
- ② 岩石表面细微结构的表示方法;
- ③ 岩石的构造成分,色彩分布的表示方法。

下面将要介绍的分形方法可以实现上述表示方法。同时,细小裂纹的生成方法,也可以用来生成岩石形状或者岩石上的石纹。

★ 1. 分形方法

在表示岩石的场合,与其形状相比,岩石表面的形态对其质感的影响非常大。例如大理石上存在着特殊的石纹,砂岩表面很粗糙,仿佛存在着许多沙粒。在表现这种质感时,输入实际存在的物体的图像,对对象物的表面进行纹理匹配,是最简单的方法。但是,要表现岩石的裂口或者是表现光从各个方向照射过来时的立体感时,简单的纹理匹配方法就不够用了。

为此,有研究报告提出了导入实体纹理的概念^[30~32]。所谓的**实体纹理**,是指在三维空间上描述的纹理模型。根据这个概念就可以在三维空间上生成大理石的石纹模式,无论从哪个断面,都可以获得该模式。分形方法在这个三维纹理的生成过程中,可以用来生成某种大理石独特的变化纹理^[32](参见彩图 7.6)。

用碰撞匹配的方法可以表现铸造物体的表面^[33]、石墙^[34]等。在这些方法中,铸造物、岩石表面的凹凸状态的纹理都是用分形的方法生成的。之后,将生成的纹理匹配在物体的表面,便显示出逼真的立体感。

按这种方法生成的岩石模型可以用来表示石墙、石堆,在建筑领域中,可以用来作为内装饰和外装饰的广告计划书。

彩图 7.7,彩图 7.8 都是用分形方法生成石墙的纹理之后,在城墙壁上和壁面上进行匹配的示例。

★ 2. 细小裂纹的生成方法

在混凝土的表面、大理石、暴露在外的岩石、陶瓷器的表面、树皮,以及瓜皮上都可以看到细小裂纹。细小裂纹的形状作为材质感的视觉印象,是非常重要的因素,所以其仿真方法在计算机图形学领域中,作为材质感的表现方法有许多应用。目前,为了对泥这类干燥后会产生细小裂纹的物质的裂纹形状进行仿真,提出了以黏着性为参数的成长模型,在陶瓷器中加入釉后产生细小裂纹的成长模型,以及玻璃上的细小裂纹图案的生成模型^[22,25]。彩图 7.9 给出了一个釉的细小裂纹的仿真示例。

7.10 布、皮肤、皮革的表示

皮肤在用计算机图形学手段进行人体描述时,是一个不可缺少的部分。从其表现的方法来看,与表现布、皮革有许多共同的地方。

在表现布、皮肤、皮革时,需要如下所示的方法^[37,38]:

- ① 布、皮肤、皮革的形状及其形变的表示方法;
- ② 布、皮肤、皮革的质感的表示方法。

目前,②的方法中包括了

- 特有的细微结构的表示方法^[39,40];
- 基于反射模型的表示方法^[41];
- 中间型方法(如纹理元素等)^[42]。

这里,就布、皮肤、皮革的质感的表现方法进行论述。

★ 1. 布的质感的表示

布的反射模型的研究很少,一般情况下都是采用纹理匹配的方法,在表现布的图案时几乎都采用这种方法^[43]。这里,为了表现布的独特光泽,对基于布的内部结构所导出的光的反射模型进行说

明^[44]。布的最小单位是纤维，一般是透明的物质。数十根、数百根纤维集成一束形成了丝。一根丝或者是数根丝集在一起形成了线。线纵横交织在一起就形成了布。根据这种布的内部构造，就可以导出布的反光模型。首先，假设布是由按照一定方向排列的丝所构成的（参见图 7.5）。将布在丝的上下方向上断开，就会看到一个个的椭圆柱，所以就考虑由圆柱形的线平行排列的状态。在丝的内部密密麻麻地排列着纤维。根据方向性的有无、反射位置、颜色等，可以将布的反光分为三种类型的成分^[45]。这就是正反射（镜面反射）成分、内部反射（多重反射）成分、漫反射成分。可以分别导出对应于这三种成分的反光模型。

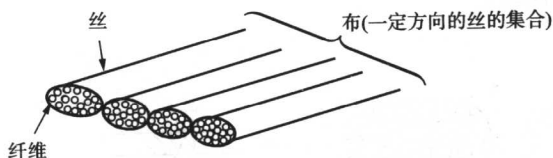


图 7.5 简单化的布的构造模型

(1) 正反射光模型 正反射光是纤维层最上面的纤维表面的反射光，具有很强的方向性（依赖于入射光的方向，按照一定的方向进行强反射）。因为这不是到达纤维内部的透射光，所以与光源自身有相同的颜色特性。又因为密布的纤维构成了丝，所以正反射只在纤维层的最一层的表面发生（参见图 7.6）。在纤维的走向上，因为纤维几乎是平行排列的，所以表面的法线也几乎与之垂直，因此，反射光线发生散乱的程度很小。另外，因为在与纤维的方向垂直的断面上，表面的法线朝着各个不同的方向，所以反射光线的散乱程度很大。考虑了这种反射特性之后，就可以用异方向性反射模型^[46]来表示表面的性质。

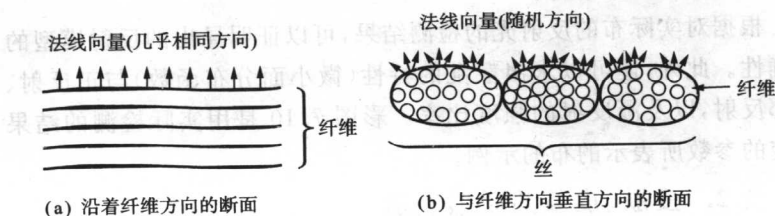


图 7.6 依赖于纤维方向的布的断面形状

(2) 内部反射的模型 在布的光线反射中,与其他的素材不相同的特征是,存在内部反射(多重反射)成分。这是在最上层,透过纤维表面的光,在各个纤维层的边界上不断地反射,透射保持方向性地,从表面放射出的光。纤维具有紧密排列的层结构。其大体上的层结构如图 7.7 所示,可以近似为平行的薄膜层结构。实验结果表明,这种薄膜层的反射光与实际中布的反射光几乎有同样的光泽。各个边界面上所发生的反射,与这种正反射光相同,沿着纤维方向的反射光的散乱程度很小,与纤维垂直方向上的反射光的散乱程度很大。此外,层数越深,其散乱程度越大。最基本地,对这种平行薄膜层进行建模,考虑光的散乱性质,以及异方向反射模及与光的吸收,就可以获得其内部反射的模型。

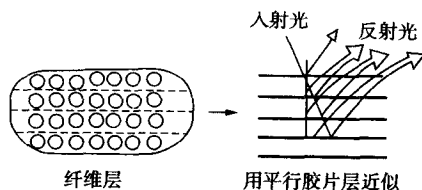


图 7.7 用平行薄膜层近似的纤维层

(3) 漫反射光成分的模型 布的反射中存在着与入射方向无关的一部分光朝着各个方向漫反射的现象。在计算机图形学中,可以用一般的漫反射模型来表示。

(4) 纵线与横线的反射 实际所生产的布是横线与纵线交织在一起的。除了漫反射光线外,因为线的不同方向上的反射光是变化的,所以与表面反射和内部反射相关的反射光的计算,需要对两个方向上的线进行反射计算,之后根据纵线、横线在布表面所占的比例进行合成(加权和)来求得。

根据对实际布的反射光的检测结果,可以证明导出的反射模型的正确性。此外,还可以求出散乱的特性(微小面分布函数)与正反射、内部反射,以及漫反射的强度比率。彩图 7.10 是用实际检测的结果确定的参数所表示的布的示例。

★ 2. 皮肤、皮革的质感表示

在皮肤的质感表现中,需要表现表面的细微的纹理特性,以及光

泽的特性,这个处理方法包括了输入实际的皮肤图像,直接将其作为纹理来利用的方法^[47],以及对输入图像进行纹理分析,获得其特征参数,根据特征参数重构出皮肤的纹理的方法^[48]。但是,对于自由生成皮肤的模型,需要建立可以表现皮肤特征的生成模型。这里就如图 7.8 所示的,基于 Polonoie 分割的方法开发出的皮肤纹理的生成模型进行论述^[49,50]。

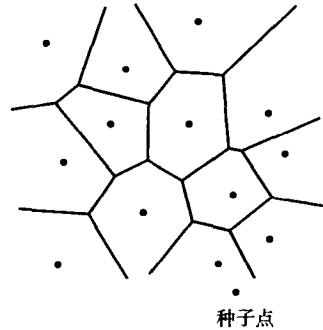


图 7.8 Polonoie 分割

我们所能观察到的皮肤表面的特征包括皮表、皮沟两个结构的重要特征。皮沟是形成皮肤表面网状结构的沟线,皮表是被皮沟所包围的各种形状的区域。皮沟模型的生成,可以用 Polonoie 分割的方法,生成网状的模式,构成网状结构的线段,由分形方法获得。皮表的形状,则是根据 Polonoie 分割,得到的被各个网线包围的多边形,其皮表略微突出的特性,可以用曲面形状来表现。利用纹理模型的方向依赖性,以及分层结构特征的伸缩变换和分层的 Polonoie 分割,可以控制模式特征^[49]。基于这种模型所生成的皮肤的示例,如彩图 7.11 所示。

与皮肤上的光反射有关,一个不同折射率的透明层相互交汇在一起的多层结构模型,可以构造层间边界上的反射、透射,层内的吸收、散乱,以及多层结构的多重反射模型^[50]。

这个模型不仅仅可以用来描述人的皮肤,还可以用来描述动物皮肤的纹理。改变模式的生成规则,如彩图 7.12 所示,还可以表现鳄鱼皮^[51]。

参考文献

- [1] 宫田：“山岳・地形の生成技法の研究動向”，情报研報，89-CG-40，pp.70-80 (1989)
- [2] 千葉 ほか：“尾根線の再帰生成による侵食作用による形成された出岳形状の定義法”，テレビ誌，45，10，pp.1240-1248 (1991)
- [3] 安生：“自然現象のモデリング手法”，情报学 46 全大，チュートリアル・セッション (1993)
- [4] 安居院 ほか：“三次元山岳形状の等高線からの自動作成法”，信学論，J69-D，12，

- pp. 1905-1912 (1986)
- [15] G.Miller: "The Definition and Rendering of Terrain Maps", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 20, 4, pp. 39-48 (1986)
- [16] 成瀬, 青木: "CGにおける地形モデルのデータ生成法", 信学春季全大, 6-273 (1989)
- [17] J.T. Kajiya: "New Techniques for Ray Tracing Procedurally Defined Objects", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 17, 3, pp. 91-102 (1983)
- [18] Paramount: *Star Trek II: The Wrath of Khan* (film) (1984)
- [19] 千葉: "樹木・草木の生成に関する研究動向", 情処研報, 89-CG-40, pp. 81-86 (1989)
- [10] 大野: "植物を対象とするCG技術の研究動向", 情処研報, 91-CG-52, pp. 13-18 (1991)
- [11] 早乙女 ほか: "生物学的モデルに基づく紅葉の可視化", 情処学CGシンポジウム'92論, pp. 59-68 (1992)
- [12] 千葉: "樹木", 画像電子学会・Visual Computing'93 (1993)
- [13] K. Tatamura, et al.: "A Display Method of Trees by Using Photo Images", J. Information Processing, 15, 4 (1992)
- [14] A.Lindenmayer: "Mathematical Models for Cellular Interactions in Development", Abstracts, 4th Annual Symp. on Biomath. & Comput. Sci., Life Sci. (1966)
- [15] M.Anno and T.L.Kunii: "Botanical Tree Image Generation", IEEE Comput. Graph. & Appl., 4, 5, pp. 10-34 (1984)
- [16] A.R.Smith: "Plants, Fractals, and Formal Languages", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 18, 3, pp. 1-10 (1984)
- [17] P.E. Oppenheimer: "Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Tree", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 20, 4, pp. 55-64 (1986)
- [18] 中嶋 ほか: "景観表示のための樹木の生成手法", 第4回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 22-29 (1988)
- [19] P.Prusinkiewicz, et al.: "Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 22, 4, pp. 141-150 (1988)
- [20] P.Reffye, et al.: "Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 22, 4, pp. 151-158 (1988)
- [21] 大野: "山岳の表示 (その2)", PIXEL, 50, pp. 153-157 (1986)
- [22] 千葉: "自然物・現象のCGシミュレーション", 可視化情報, 13, 49, pp. 31-38 (1993)
- [23] "Particle System Modeling, Animation, and Physically Based Techniques", SIGGRAPH'92 course notes 16 (1992)

- [24] M.Shinya, et al. : "Stochastic Motion-Motion Under the Influence of Wind", Eurographics'92 (1992)
- [25] 千葉 : "渦場と粒子による煙や炎の2次元CGシミュレーション", 信学論 (D-II), **J76-D-II**, 8, pp.1735-1745 (1993)
- [26] G.Y.Gardner : "Simulation of Natural Science using Textured Quadric Surfaces", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **18**, 3, pp.11-20 (1984)
- [27] R.F.Voss : "Random Fractal Forgeries", SIGGRAPH '86 course notes 11 (1986)
- [28] K.Miyata : "A Method of Generating Cloud Images Using Density Contour Lines", Trans. IEICE, **E72**, 6, pp.763-770 (1989)
- [29] 千葉 : "自然物体のCG表現とその応用", テレビ誌, **46**, 7, pp.906-914 (1992)
- [30] D.R.Peachey : "Solid Texturing of Complex Surfaces", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **19**, 3, pp.279-286 (1985)
- [31] K.Perlin : "An Image Synthesizer", Comput. Graph., **19**, 3, pp.287-296 (1985)
- [32] 岡田 ほか : "画素シフト法に基づく非解析的テクスチャとその自然対象物生成への応用", 情処研報, 89-CG-40, pp.9-16 (1989)
- [33] 鶴岡 ほか : "フラクタル手法を用いた物体の材質感表現", 第1回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.107-113 (1985)
- [34] K.Miyata : "A Method of Generating Stone Wall Patterns", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **24**, 4, pp.387-394 (1990)
- [35] 中嶋 ほか : "確率モデルを用いた割れ目形状の生成", 1990 信学春季全大, D-605 (1990)
- [36] 横井 : "金属・岩石の生成に関する研究動向", 情処研報, 89-CG-40, pp.87-92 (1989)
- [37] 今岡 : "服地・布の生成に関する研究動向", 情処研報, 89-CG-40, pp.93-98 (1989)
- [38] 横井 : "ビジュアルイゼーションの白新動向", テレビ誌, **46**, 10, pp.1339-1345 (1992)
- [39] J.Weil : "The Synthesis of Cloth Objects", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **20**, 4, pp.49-54 (1986)
- [40] H.Weatin, et al. : "Predicting Reflectance Functions from Complex Surface", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **26**, 2, pp.255-264 (1992)
- [41] 村上 ほか : "布地の光反射モデルに関する実験的検討", 情処研報, 91-CG-50 (1991)
- [42] 木元 ほか : "拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表示", 信学論 (D-II), **J75-D-II**, 4, pp.706-713 (1992)
- [43] 木元, 大野 : "テクスチャ・マッピングによる布の材質感表現", 情処学 37 全大, pp.1685-1686 (1988)
- [44] 村上, 安田, 横井, 鳥脇, 稲垣 : "布地の光反射モデルに関する実験的検討", 情

処研報, 50-GCAD-8 (1991)

- [45] 稲垣勝彦：“織物の光沢に関する研究”，東京工業大学博士学位論文(1979)
- [46] 高木, 横井, 鶴岡, 三宅：“異方性反射モデルに関する検討”，情処研報, 11-GCAD-1 (1983)
- [47] 三船, 藤本, 横山, 北川：“CG を目的とした人体皮膚の特徴抽出”，情処学 36 全大, 12-7, pp. 2081-2082 (1988)
- [48] M.Nahas, H.Huitric, M.Rioux and J.Domey：“Facial Image Synthesis Using Skin Texture Recording”，The Visual Computer, **6**, pp. 337-343 (1990)
- [49] 石井, 安田, 横井, 鳥脇：“表面の微細形状に注目した皮膚の質感実現の一手法”，情処学論, 32, 5, pp.645-654 (1991)
- [50] 石井, 安田, 横井, 鳥脇：“表面の微視的構造に注目した皮膚の光反射モデル”，NICOGRAPH '91 論文集, pp. 68-76 (1991)
- [51] 東海, 安田, 横井, 鳥脇：“は虫類皮革の質感表現の一手法”，情処研報, 53-GCAD-2 (1991)

第 8 章

人体的 CG 表示与应用

本章就计算机图形学在人体表示方面的应用进行论述。在介绍日本国内外研究人员在有关人物表示方面研究例子的同时,以参考技术文献的形式介绍人体的 CG 表示方法。首先,对人物图像在人类活动中所起的作用进行观察。追溯到 Catmul, Parke 的研究,回顾 CG 人物从诞生,到过去 20 多年的显著发展。接下来,对人体的 CG 表示所必须的结构元素进行整理,将具体的数据输入方法分为手工输入,二维检测,三维检测,透视检测(CT/MRI)四类进行考察。然后,对多边形表示方法,参量曲面表示方法,体素表示方法,元球表示方法等具有代表性的方法进行论述。最后,就动作的表现,人脸、头发、皮肤、衣服的生成,以及已经成为智能通信基本技术的表情与动作的识别生成方法进行介绍。

8.1 人与人物图像

从某种角度上来看,我们人类对自身形象的图像描述最感兴趣。本章就人体的 CG 表示方法与应用进行说明。因为人体是三维物体的一种,所以人物图像也可以采用表示其他物体时所用到的各种计算机图形学方法来生成。只是人物的表现与其他物体相比,随着年龄的增大,其形态,皮肤颜色,动作都会发生变化。此外,人的行动与感情是相互联系的,这一点也是非常复杂的。因此,根据表示的部位以及目的的不同需要将多种计算机图形学方法分开使用,之后再组合到一起。本章将给出一部分实例,对每个例子中所使用的技术,以参照文

献的方法对人体的计算机图形学表示技术进行介绍^[1~4]。

婴儿出生后最早看到的图像,应该是人的脸,活动的身体和手。婴儿最初只能感受到光,但是逐渐地看到人脸或动作就会笑了。人物图像是我们生活中最感亲切的画面,语音也是同时传递信息的重要信息。最初,人们就已经非常清楚人物图像在人与人之间联络中的重要性。上田秋成在《雨月物语》的菊花之约中,就有死去的武士化作幽灵和远方的朋友见面的场景描述。莎士比亚的作品中,也有父亲的灵魂出场亮相的情景,描述了超越时空的人物的形象。而现代的电影已经给了我们丰富的信息,日本的动画片在海外也非常受欢迎。为什么在传达某件事情时,在只要有声音就足够的情况下还要使用人物图像?在这里或许对人物图像的含义过于强调了。但是对于人来说,将古今中外身边最重要的对象用计算机图形学的方法来进行表示的想法是非常自然的。在不久的将来,会话、广播、电视、教育、仿真等,人类活动的各种场面都可采用“CG人类”的方式来表达了。

8.2 CG 人的诞生与成长

现代的计算机可以表示什么样的人脸?说的重一点,就是“键盘式表示”的人脸。在电影中所演示的仍旧是转着旧式磁带机的计算机。在电影《2001年宇宙之旅》中出场的未来计算机“Hello”也是用灯的闪烁以及声音来表现的。但是最近几年,计算机图形学技术得到了飞速的发展。让计算机拥有像人类一样的脸已指日可待。

如果从年龄的角度来比喻的话,现代的CG人物正处于活力无限的青年年代。实际上,用计算机图形学来表示人物图像的研究,早在20世纪70年代初期就已经开始了^[2]。现在的个人计算机已经可以非常轻松地进行相关的计算,在1972年,只有放置在非常大的房子里的巨型计算机才可以完成。就在这样条件的1972年,Catmul^[5]展示了人手五个手指动作的动画片,使大家感受到了强烈的震撼。1971年左右,Parke在I. suntherland所在的犹他州大学,研制出了人脸的动画片,很早就提出了基于人物图像的模式编码,这也成为智能通信的基础^[6]。在计算机还未普及的年代中,就提出了现代仍旧通用的设计思

想,并且对其中的一部分进行了具体的实现,从这点来看,他们的业绩是非常卓著的。

CG 人物是从脸部开始成长起来,到了 20 世纪 80 年代,许多相关的研究报告被陆续发表。其中包括了使用 Platt 和 Badler^[7]提出的肌肉模型获得的表情动画,以及基于 Parke^[8]的参数模型, Waters^[9]的新型肌肉模型,所生成的表情动画。接着,就展开了人物全身的表达研究。特别地, Thalmenn 夫妇的动画片《Rendez-vous a Motreal》^[10]中出现的玛丽琳·蒙罗和韩傅力·伯卡特,以及 PIXAR 创作的获 Adademy 奖的作品《Tin Toy》中的婴儿等均受到了关注。日本早期的 NHK 的《惊奇的小宇宙——人》^[11]的影片中就用到了 CG 人的表现形式。该影片中,用高清晰电视制作的 CG 人物从骨头到内脏等内部组织完全可以表示。

在此期间,计算机和图形硬件得到了飞速的发展,随着计算量的不断增大,CG 人物也在不断成长。现在,已经可以用个人计算机制作与真人信息非常相近的人体静止图像。如果使用最新的图形工作站,则可以对由相当数量的多边形来表示的人脸对象,实现实时的人脸表情动画的制作。1988 年,在 SIGGRAPH 的电视展中,由 B. deGraf 等人设计的 CG 人脸“Mike, the Talking Head”已经播出。1989 年, SIGGRAPH 大会中的 CG 歌手“Dozo”初次露面,就在听众中引起轰动。从追求真实感的角度出发,在 1990 年 SIGGRAPH 的开幕仪式上所介绍的渡部等人^[12,13]设计的有头发的 CG 人物图像受到了大家的关注。此外,由个人计算机制作的,非常精致美丽的芭蕾舞的静止图像“天鹅湖”(Yoshimoto^[14])受到了许多人的赞赏,并获得多个著名的 CG 竞赛大奖(参见彩图 8.1)。

CG 人物在动画片以及电影世界中,发挥着非常重要的作用。CG 人物活跃的舞台越来越广阔。特别是,卢卡斯电影公司制作的影片《终结者 2》中的 CG 人物“T-100”,用各种 CG 技术与特技组合成各种场景,例如在火或者地面中出现,“液体金属”身体的自由变幻等,打破了目前电影的常规,获得了好评。前面提到的 Thalmann 夫妇设计的人脸、表情、头发、身体的动作、衣服等,无论哪一方面,都可以与真正的演员相媲美^[15]。

8.3 人物的CG表现方法

★ 1. 人物图像的构成元素

现实中人的身体可以看成是由许多元素构成的非常精密的机器，是满载高技术的化学工厂。现实中的真实人的外观，是由人体内部器官的各种处理的结果所形成的，但是在生成CG图像时，未必需要全部考虑。在可视光的范围内，人体是一个不透明物（但是头发，衣服等一部分需要当作半透明来处理）。因此，生成CG人物的静止外貌时，只要有描述外部（皮肤）的数据就足够了。随后，花很少的工夫，修正数据，变换成各种动作。例如嘴或单只眼睛的开闭动作，用外部（皮肤）的数据就可以实现。但是要把人脸的各种表情，非常生动的肌肉动作，自动行走等赋给CG图像，仅用描述外部的数据是无法实现的，还需要描述骨头、肌肉，以及身体内部化的信息。

生成CG人物所必需的结构元素，如图8.1所示。头部的结构元素就有十几种。如果要构造全身，即使进行粗略的分类，也需要数倍

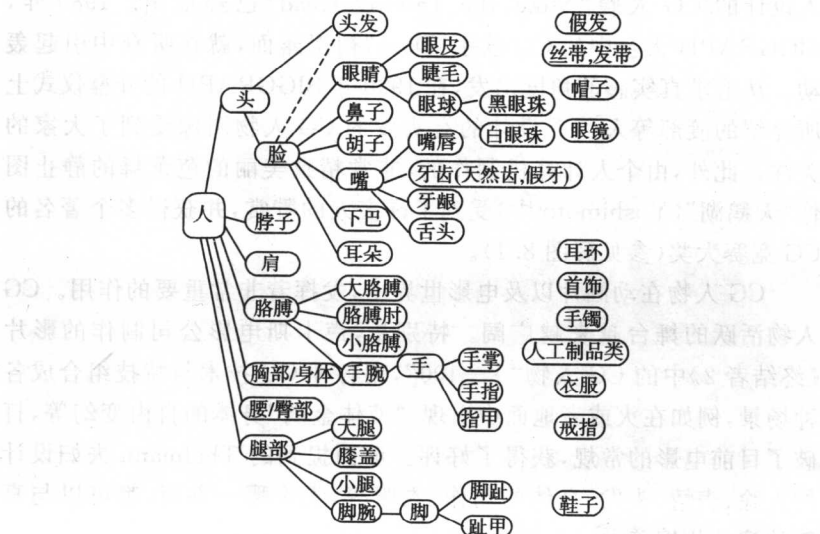


图 8.1 人物图像的结构元素

以上的结构元素。在此之上,还需要加上各种衣服、装饰品、鞋子等。如果要用最严密的方法来生成人物图像,当然需要对其全部考虑。但是,如果利用简化后的结构和各种方法,即使没有使用全部的元素,也可以实现非常生动的人物图像。然而,这时应该准备的元素,以及应该使用的方法,则根据目的的不同而大相径庭。有关这方面的内容,我们将在下一节中进行说明。

★ 2. 数据的输入

图 8.2 是生成人物图像的大致过程。复杂人体的建模与造型有各种方法,将各种方法进行组合后的方法也有很多。在实际中,根据不同的研究目的进行选择。

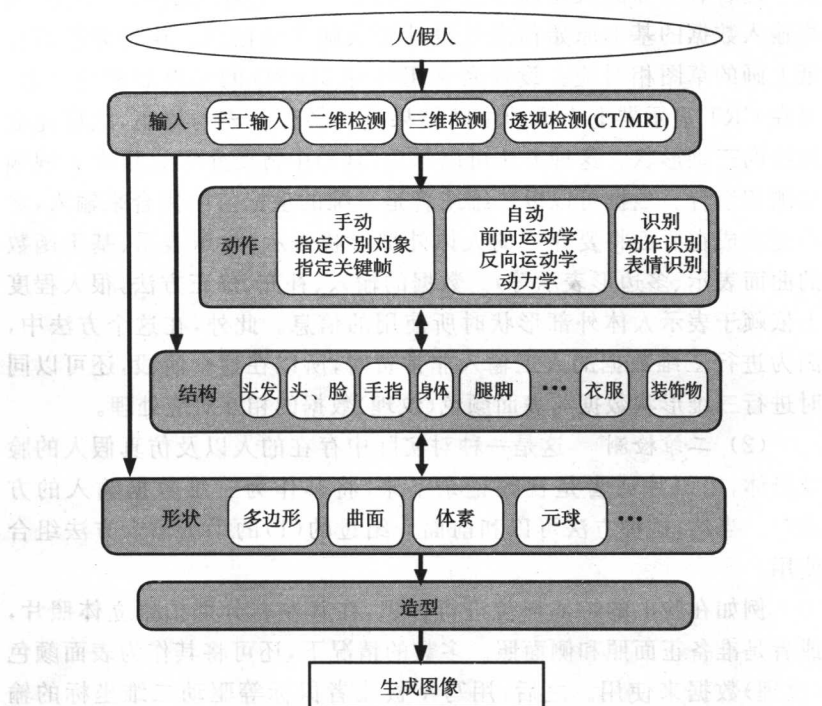


图 8.2 人物图像的生成过程

首先是人体的表面颜色(纹理)数据的输入。这项操作在目前,可以用彩色摄像机这类图像输入装置来完成。输入的数据,作为纹理图

像存储在计算机中,在后面的造型中使用。在多数情况下,纹理与后面论述的人体形状数据的对应是采用人工的方式来判断的。此外,采用什么样的纹理也因使用场合的不同而不同。例如将人脸全部作为一个纹理来处理的场合,只将头发模型作为纹理的场合,只对皮肤的细微结构用纹理来表示的场合等需要按照不同的方式来描述。这与后面所论述的人体形状的表达也有关系。

从本质上讲,人体外部形状数据的输入就是三维数据的输入,所以事情就变得非常复杂。目前正在尝试很多方法,下面,就四种具有代表性的方法进行论述。

(1) 人工输入 这是一种人工输入形状数据的方法。设计者可以一边看着实际的人物模型或者人物照片,一边输入数据。但是,最终输入数据的基本原始信息是设计者大脑中的信息。这种方法与在纸上画的草图相对应。设计者利用各种 2D/3D 的编辑器和建模器,对在 CRT 显示器上表示的中间结果进行各种补充与修正,之后完成最终的三维形状。这种方法可以和后面(2)中将要介绍的照片 / 视频检测相组合。数据可以以二维或者是三维的坐标值的集合来输入,之后变换成在后面将要介绍的人体外部形状表示(元球表示、基于函数的曲面表示、多边形表示等)。数据的输入、补充、修正方法,很大程度上依赖于表示人体外部形状时所使用的信息。此外,在这个方法中,因为进行三维数据的人工输入非常费时,所以在这个阶段,还可以同时进行三维形状数据与表面颜色(纹理)数据的相互对应处理。

(2) 二维检测 这是一种对实际中存在的人以及仿真假人的脸及身体,用照片或者是视频记录下来,将其作为三维数据输入的方法^[8]。当然,这种方法可以和前面介绍过的(1)的手工输入方法组合使用。

例如在脸上的特征部位进行标识,在其左右分别拍摄立体照片,或者是准备正面照和侧面照。多数的情况下,还可将其作为表面颜色(纹理)数据来使用。之后,用写字板或者鼠标等驱动二维坐标的输入,输入二维坐标数据,并且通过对应的立体数据的计算,获得三维坐标信息。如果直接用摄像机获得视频信息来替代照片,并将获得的视频信息作为数字图像输入到计算机中,则可以在 CRT 显示器上显示原图像。对于所有的情况,对应立体图像的各部位的操作必须由手工

来完成。因此,只使用作为输入装置的摄像机,输入正面图像和侧面图像,对预先放在计算机中的通用的三维人脸模型进行变形处理,可以获得适用于特殊个体的人脸形状^[16,17]。在这种情况下,因为可以对彩色人脸图像进行处理,自动地寻找对应点,所以三维形状数据与纹理数据也可进行自动的对应。

(3) 三维检测 在近期,各种透镜传感器都已经实用化,可以比较简单地以高精度输入形状数据^[18~21]。这种透镜传感器具有检测精度高,检测时间短,使用方便等优点。但是在目前,价格还很高,无法达到普及的程度。即使是只检测人的头部,也是一个非常大的装置。而如果是检测全身,那就需要更大的装置了。从头部开始到指尖,一次就完成精密测量的装置,目前尚未开发出来。此外,对于照射不到透镜上的,落在阴影中的部分,例如胳膊的内侧等地方,原理上不可能是一次测量的。因此,先只对胳膊进行独立测量,之后将胳膊举起,对身体部分再进行测量。这样,就需要对多组数据进行匹配组合。

一般情况下,为了分别对表面彩色(纹理)数据与形状数据进行检测,需要人工方法将两者进行对应。特别是对人这种动的物体,这个对应处理是一个非常困难的问题。例如 Williams^[22]用手工进行这样的对应处理,一组数据需要花费两个小时。为了解决这个问题,将基于透镜的透镜传感器与彩色摄像机进行组合,构成可同时输入形状数据和表面彩色数据,并对应于所获得的形状的检测装置^[23]。彩图 8.2(a),(b),(c)是用同一个装置检测的结果。彩图 8.2(a)是表示表面彩色数据的二维彩色图像,彩图 8.2(b)是只用形状数据进行造型处理后的结果,彩图 8.2(c)是同时用形状数据与彩色数据进行造型处理后的结果。

(4) 透视检测(CT/MRI) 用 CT 或者 MRI 对人体进行检测,可以获得骨头、肌肉、内脏等包括内部结构在内的身体的三维图像。检测结果是,可以获得从身体的外部形状,到身体的内部结构的体素数据。实际上,进行这种包含内部结构的造型非常多。用 CT/MRI 输入的数据,可以提取出身体特定部位,例如骨骼部分或者是身体外部形状等。因此,在 CT/MRI 图像的各个断面图像上,通过手工或者图像处理,将身体的外侧轮廓先提取出来即可。一般情况下,外部表面的纹理,需要用别的图像输入手段输入。

目前的现状是,用这种方法获得数据还不能达到高的分辨率。为

了提高分辨率,装置检测的时间就会加长,特别是对于活人进行检测时,还需要考虑确保身体的安全,减少精神负担等问题。这种方法的本质是感知从外面看不见的内部结构。例如对头部畸形或头部损伤的患者,可以进行整形手术的效果仿真。此外,对于在棺材中存放的很久以前的木乃伊的内部、体格、身体形状的检测,也可以采用CT的方法^[24]。

☆ 3. 形状的表现方法

用计算机图形学的方法表示人物图像时,需要先建立人体的形状模型。在表示人物图像时,纹理匹配是最理想的方法。如果能够根据所表示的部位,获得原有的真实二维图像(纹理)的话,则用非常简单的形状(例如将头部近似成一个圆球等),就可以看到原物的结构。我们可以通过日常所使用的二维人物脸部照片(可以看作是在平面上的纹理匹配)来理解这个原理。纹理匹配方法可以与后面将要介绍的人体形状的表现方法组合使用。

下面,我们对具有代表性的人体形状的表现方法进行介绍。

(1) 多边形表示方法 这是一种用多个多边形来表示人体形状的方法,是最直接,也是最简单的方法。现在的图形工作站都备有以多边形为对象的图形专用硬件(包含插件),具有对大量的多边形进行实时显示的能力。为了保证视觉效果,为了表现出曲面的平滑性,需要使用多个多边形,非常细致地近似曲面。即使如此,如果对局部进行放大的话,这个部分的多边形还是非常明显的,这是这类方法的缺点。

图 8.3 是表示人脸的多边形的示例。在这个例子中,因为所使用的多边形的数目比较少,所以如果就此进行造型处理的话,可得到彩图 8.3 所示的效果。如果要用比较少的多边形反映出真实感的话,就需要与上面所介绍的纹理匹配进行组合。另外,如果能够用十分细致地近似原曲面的多个多边形给出各个多边形部分的真实色彩,那么即使不采用纹理匹配,也可以生成非常精细的图像。这种方法不仅限于人脸,也可以用来表示手、脚、手指、全身等。但是要很精密地近似原有形状,需要庞大数目的多边形。并且为了有效率地进行形状的变形,不得不同时使用其他模型。

(2) 参量曲面的表示方法 这是一种用参量曲面表示人体外形

状的方法,适用于光滑表面的表示。即使进行局部放大,也不会降低分辨率。这种方法同样不仅可以用来表示人脸,还可以用来表示手、脚、手指、全身。对表示人体中的一个特别重要的问题,即可变形表面的研究, Barr^[25], Sederberg^[26] 等人发表了 free form deformation (FFD) 的研究报告。小松^[27] 则采用四阶 Bezier 元素面表现人体的全身,用 Gregory 元素面表示关节部分。Thalmann 夫妇则提出了适用于局部变形的 joint-dependent local deformation (JLD) 的运算方法^[10]。Thalmann 夫妇还演示了 synthetic actors(合成演员)的制作,除前面提到的玛丽琳·蒙罗和韩傅力·伯卡特,还制作了埃尔比斯·普莱斯利和麦当娜。

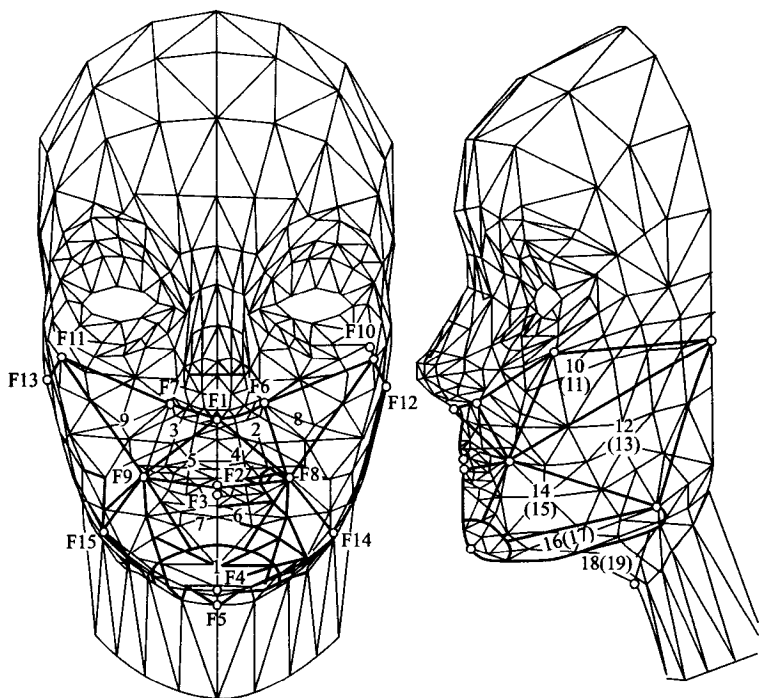


图 8.3 基于多边形集合描述的人脸模型

(3) 体素的表示方法 这是一种用三维体素集合来表示人体形状的方法。与前面介绍的透视检测(CT/MRI)有着密切的关系。本

表示方法的本质是,表示身体的内部结构,并对包含这些内部结构的物体进行造型。为此,这种方法又统称为体素造型或体素表像化。目前,这类方法正在进行各种更加深入的研究^[28]。

(4) 元球表示方法 最初所介绍的芭蕾舞图像(参见彩图 8.1)就是用这种方法与纹理匹配相结合制作而成的^[14]。这是一种用离散配置的电荷所形成的等电位面的形状,来描述三维形状的方法,是由日本大阪大学提出的,称之为元球表示方法^[29~32]。在其他国家,则比较多地称该表示模型为 Blobby Model(滴状模型)。之后,Wyvill 又称其为 soft object(软对象)专用表示模型^[34]。

作为表示元球截面形状的函数形式,Blinn^[33]采用了与电磁学中相同的形态(具有与正态分布的密度函数相同的形态)。但是,为了实现快速计算,通常采用的是分段二次函数来近似。好在即使是采用近似函数,所生成的图像也没有很大的差异。当然,需要逐个确认其正确性。

与基于函数的曲面表示方法相同,这种表示形式也适用于平滑曲面,具有局部放大后,也不会降低分辨率的优点。同样,这种方法不仅限于人脸的表示,也可以用来表示手、脚、手指、直到全身。但是,对于在后面将要介绍的,表示出一根一根头发的效果是不太适用的。在最初的表示形式中,对于手脚、手指等细长形对象的表示,需要许多的元球。有时,因为条件所限,会引起不自然的融合(例如在手指与手指之间好像长出了蹼)问题。但是如果导入具有方向性的偏心元球或超级元球来控制融合程度,则可以减弱这些问题。如果配备使用方便的,以元球为对象的对话型编辑器,元球就不仅可以表示一般物体,而且也可以生成人物图像。

在具有正电荷元球基础上,加入具有负电荷的元球,则可以设计出各种各样的形状。在设计(会话处理)阶段,可以将不需要造型处理的只表示元球截面形状的方法,与变换为多边形进行快速造型的方法等组合使用。最终,可直接在用元球表示的物体上,采用光线跟踪来生成图像。为了缩短计算时间,有研究人员提出用比较小的多边形来近似表示元球,利用图形工作站的图形专用硬件实现快速造型的方法。随着图形专用硬件对许多基本功能的实现,对纹理匹配的功能的影响非常大。元球表示法主要是以会话形式,一边确定中间输出结果图像,一边进行设计的方法。也可以将已经检测到的用三维坐标表示

的数据,或者是多边形表示的数据,用元球来近似。例如村木^[35]提出了用能量最小化方法,作为三维物体的特征描述、特征识别的手段,这是一种将给定的三维物体形状数据用元球来近似的方法。

除了上面所讨论的方法以外,还有用描述特征的函数来近似表示人头部、身体的三维形状的方法,以及使用超二次函数(superquadrics)、特征向量展开等表示人体的方法。

☆ 4. 动作的表示方法

如果以制作少数几张静止图像为目的话,则只需要使用上面所介绍的形状模型就可以生成人物图像。但是,如果需要生成多张包含动作或者变形的人物图像,则单有人体形状模型是不够的,还需要对动作或变形进行处理的模型。将由动作模型制作的动作,反映在外部形状模型上,就可以生成动画。有时也将动作模型与形状模型合为一体来进行处理。为了生成一个动作,可以使用各种模型和方法。最基本的描述动作的模型是骨骼模型。在一般情况下,待处理的骨骼设为刚体。因为人体只有在关节部分才可以动,所以将其作为描述动作的基本模型。即使是这种最基本的动作模型,也包括手工输入和自动输入各种方法。采用这些方法对动作的结构进行描述^[36]的同时,就可以自然地表示动作发生时的变形^[37]。因而,为了一般动作的描述和形状的生成,需要在骨骼上加入肌肉、脂肪、皮肤,头发等结构元素。有关动画制作的方法,在第9章中还将进行详细的论述,这里,仅就人体的生成进行介绍。

以迪斯尼作品为代表的初期的动画片中,为了对人动作进行写实性的描述,各个部位的动作都由手工绘制,作为二维的关键帧的参数输入。Robert Abel^[38]等人,对手脚都被盖住的人体动作进行拍摄,获得三维空间上的动作数据,并用这些数据制作了非常漂亮的具有金属外观的CG人。Calvert等人将舞蹈设计师给定的几个身体的姿态在显示器上进行观察并进行定义,将其作为关键帧依次选择,开发出可自动地生成舞蹈连续动作的系统“COMPOSE”。Lee & Kunit^[39]则通过图像处理,实现了数据输入的简便化。Thalmann夫妇则用名为SMILE的多媒体系统制作了动画片^[40]。

动作描述自动化的基本方法之一是 inverse kinematics^[41](逆运

动学)。例如当要拿一个物体时,需要确定伸出胳膊时,各个关节所旋转的角度,这与机器人手臂的控制有很大的关系。

假设肌肉是一种弹簧,并且考虑各个元素的质量,求解在此前提下的运动方程,这种方法称为物理建模方法。目前这种物理建模(physical-based modeling)方法的表示非常盛行,该方法是有以下优点:

- ① 只要输入物理参数和行动平台即可^[42];
- ② 可以更加自然地表示动作^[43];
- ③ 可以表示障碍物等物体的交互作用。

Bruderlin 等人在 1989 年的 SIGGRAPH 中,发表了人类步行的写实动画片的制作方法^[43]。以 KLA(Walking)命名的这个系统,将体重用单腿支撑和两脚支撑的模式序列,控制步幅、节奏、步行速度,制作出非常逼真的动画片。Thalmann 夫妇用有限元法来表示抓着东西的手^[44],并且在 1990 年的作品中,实现了双手钉钉子的场景。左手扶着钉子,随着钉钉子的力,榔头会反复地反向跳动,同时右手也随着动,制作出了非常逼真生动的动画片^[4]。像这种抓着东西的手的动画片^[45],以及自动处理手臂肌肉运动的动画片^[46]的制作,正在深入的研究之中,目前可以使用的是,不同部位、不同目的下制作的部分模型和近似模型。如果不考虑计算量的问题,则人全身的骨骼、肌肉等在解剖学上完全真实的表现动作/形状模型的制作,也是一个非常困难的研究方向。这种完备的模型目前尚无法获得,在不久的将来,相信可以正确描述构成人体的骨骼、肌肉、脂肪、皮肤等组合的图像的生成将成为现实。

★ 5. 人 脸

在人体中,人脸是印象最深的部分,因此,包含眼睛、嘴、人脸整体、头发等头部的真实感的制作是非常重要的。在制作外部模型时,比较多的是用曲面来表示身体、手脚。而头部则多用多边形或者是三角形的元素面来表示^[47]。这是因为头部的形状比较复杂,用参量曲面很难正确地表示细小的变化^[48],同时在表示全身的时候,又不允许数据量过大的缘故。此外,对于头部,也有基于 CT 图像的体数据表示方法^[49]。

如图 8.3 所示的,将多边形表示模型进行变形,表示口的动作。

对其进行造型之后的图例如彩图 8.3 所示^[50]。这时,只需要利用下巴模型计算嘴附近的若干个点的位置,然后用插值方法求得其余点的坐标即可。

将人脸的三维数据变形之后,可以生成人脸的表情^[8,50]。但是,需要建立有一定意义的,有效表情的生成规则。实际上,严格意义上的正确变形是不容易实现的。如果可以对人脸肌肉动作进行适当的仿真,表情的表示就比较简单^[7,9]。由心理学家提出的,除人脸的肌肉动作之外,考虑肌肉结构的 Facial Action Coding System—FACS^[51]也屡屡被使用。将动作单元(AU)进行组合来描述表情,如果知道什么位置上有什么动作之后可以生成某种表情的话,表情描述就非常方便。例如 AU1 表示眉毛的内侧上扬,AU2 表示眉毛的外侧上扬。

Pieper^[52]将表皮与内部组织用数层的弹簧模型来表示,用下层肌肉的动作驱动表皮的动作可以获得自然的变形,这项技术在对手术后皮肤变化的仿真中已经被使用了。

★ 6. 头 发

头发是左右人脸印象的重要因素之一。但是,头发是人体构成元素中具有最复杂形状的物体之一,用计算机图形学的方法生成头发梢,不是一件容易的事情。人平均有 5~10 万根头发,一根一根的头发是非常细的很柔软的物体,但是合在一起,用眼睛就没办法分开。决定外观的是头发的颜色及头发形成的图案(纹理),以及头发的集合所构成的头发形状(发型)。

山名等人将头发当作是附着在三维物体上的,呈凹凸状的称作发型的东西来获取,可以逼真地描述其纹理。为了表示其变形,导入了函数控制型的异方向性反射模型^[53]。这种方法在技术分类上属于纹理匹配的方法,不能对头发状态(头发的三维形状)进行建模。但是,这种纹理匹配方法与通常的纹理匹配方法不同,由于使用了函数控制型异方向性反射模型,所以当光源、照相机的角度不同时,头发的纹理会发生变化,由此可以生成更加逼真的图像。

为了将建模方法简单化,Pearce 等人采用了粒子系统(particle system),渡部等人^[12,13]则采用了三角柱体模型。根据这个方法,使用图形工作站上所配备的标准图形专用硬件(缓冲库),可以将数万根头

发在几分钟内表示出来。为了简化建模方法,采用将一根头发表示成三角柱体的连接,用束(wisp)来表示头发的集合的模型,仅用三角形柱体的方向、旋转角度、长度、粗细、个数,以及构成一束头发的根数等10种参数,就可以对各种发型进行建模。此外,眉毛、眼睫毛等也可以用同样的方法生成。用alpha-混合方法,可以表示没有虚假感的头发^[4]。为了实现更加自然的图像,self-shadowing问题的解决,对头发之间,头发与皮肤、衣服之间的物理关系的描述等,自然头发的表述方法是正在研究的课题之一。目前,已经有研究人员提出了用线状物体的运动来近似头发^[55],用概率模型表示头发的飘动等^[56,57]方法。安生等人用多个棒状要素的结合体来表示每根头发,根据材料力学领域中的单梁模型,求出重力作用下头发发生弯曲的原理,从而确定发型,并表示被风吹动的头发。用空间曲线的异方向性反射造型,可以生成非常逼真的图像(参见彩图8.4)。大口等人则提出了计算机艺术中的逼真头发的表示方法。

★ 7. 皮 肤

在皮肤的表示中,需要慎重地选择颜色,用经典的造型模型来表示,或者是用实际拍摄的人脸纹理进行匹配^[62,63]。在人体中,皮肤是比较容易用纹理匹配的方法来描述的部分。简单地说,用摄像机等拍摄到的皮肤的图像即可作为纹理匹配用的数据。用计算机生成皮肤纹理的方法,有基于皮肤结构原理的Polonoie分割方法^[64]。更加严密地,因为皮肤的反射特性与以往的造型模型不一致,所以需要调整反射频谱特性^[65]。在文献[66,67]中,考虑到表面的细微的结构,提出了皮肤的光反射模型,从而可以更加逼真地表示皮肤。

★ 8. 衣 服

衣服不属于人体,但多数场合下,是生成特定人物全身图像的重要结构元素。衣服的种类很多,所以生成衣服的方法也各不相同。例如游泳衣、芭蕾舞演员穿的紧身衣等这类紧贴身体的衣服,只要有很好的身体外部形状模型,就可以对其进行表示。不需要对衣服构造特别的形状模型,只要在身体外部形状模型上贴上衣服的纹理,就可以生成所需要的图像了。但是,一般情况下,不紧贴身体的衣服非常多,这时,需要自动地对穿在身上的衣服的素材及皱折等情况进行计算的

模型。在今日的研究报告^[68]中,对与衣服布料的生成相关的研究动向进行了论述。Thalmann 等人将被衣服遮住的部分用较粗的多边形来表示(为了缩短计算时间),计算与衣服之间的关系,获得了非常逼真的穿这外衣的人物图像(参见彩图 8.5)。坂口等人^[81]则将衣服和人体分割为微小的要素,对其各个质点进行处理,并对包含衣服的形状进行计算,由此进行了虚拟服饰环境的研究。

现实中衣服的材料使用的是各种类型的布料,对其进行某种程度的纹理匹配,可以获得比较逼真的表示效果。安田等人在他们的布表面造型模型的研究报告^[70]中提出,布表面造型技术可以增加布料花色的设计,更加逼真地再现衣服的魅力。

另外,对于用裘皮材料制作的衣服,与形状相比,毛皮独特的真实表面纹理的再现、逆光时中间过渡色的表示等都是非常重要的。为此,可以用与前面所介绍的,与头发的生成相关的处理方法来生成毛皮图像。例如 Miler^[71]提出了在物体形状的表面移植圆柱型的元素,利用反射模型生成皮毛图像的方法。Kajiya & Kay^[72]用命名为“tex-el”的三维纹理生成了非常逼真的绒毛玩具小熊的图像。Thalmann 夫妇^[15]则研究出了逆光下逼真的皮毛生成方法。

8.4 表情、动作的识别生成

表情与语音有关,在智能通信中的应用中,为了使嘴的开闭与声音同步,Parke^[6,8]进行了这方面的研究。其中包括了对应于各个音素的表情变化的规则的生成方法^[73,74],首先进行音素识别,之后对所识别的音素生成相对应的口形^[75,76]。间濑等人对摄像机所拍摄的人脸视频,根据图像处理,实时地检测人头的朝向,并将其作为 CG 视频的实时生成系统^[77]。对于人表情的生成,需要头的整体,人脸,眼睛以及嘴的动作的真实再现。Terzopoulos & Waters 利用 Snakes 模型,对眉毛、眼睛进行表示,之后用肌肉模型来生成表情^[78]。这里,人脸图像最终是由上述的表面形状来生成的。另外还有研究报告提出了用摄像机拍摄到事先用口罩等遮住的人脸,由此,可以将用激光扫描仪输入的人脸的三维模型实时地进行变形处理^[22]。对于手指动作的读取,

则有 Hand Render^[79]。这种人物动作检测与表情识别组合后生成人物图像的研究正在不断的深入。利用视频与语音,可以提供更加自然,使用更加方便的人机界面。在 Human Reader^[80]的实现中,这些方法是必不可少的技术。其应用不仅仅是在精密力学模型、人体模型方面,在人类的活动/行动模型、精神模型、人工智能模型等方面的研究也是十分必要的。

8.5 面向 21 世纪

本章结合开发出的实例,参考相关的文献,进行了概述(参见图 8.4)。人体是具有复杂结构的柔性体。但是,除此之外,人具有感知器官和智能,是一个按照意志行动的生物。目前采用计算机图形学技术生成人物图像,只是从人体表面形状的描述、变形、表示出发的。接下来,将要在内部的表示,或者是基于骨骼、肌肉、皮肤等结构的动作的表示方面进行更加深入的研究。处理的部位也将从人脸向全身拓

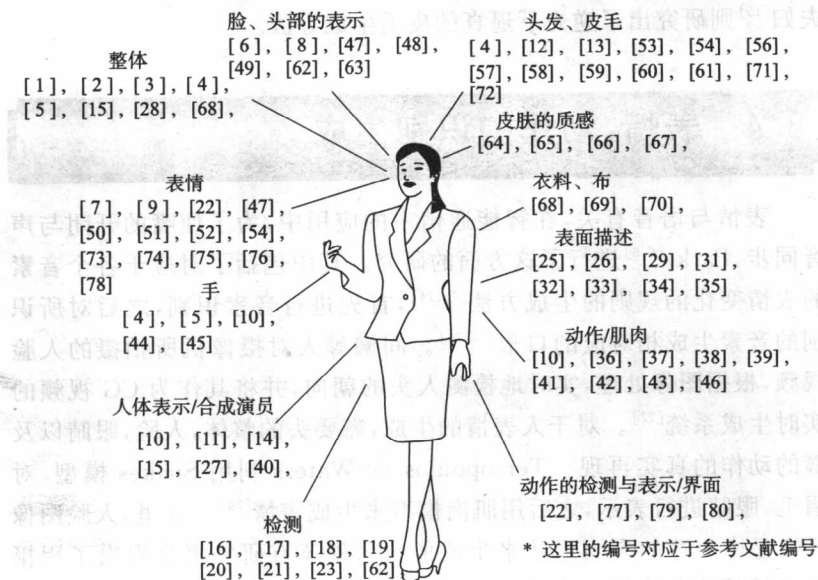


图 8.4 人体图像生成的研究

展。今后,在更加逼真地表示形状、质感,以及对“goal-directed”的动作或者是“mind-directed”动作进行表示,虚拟演员(synthetic actor)的实现,与语音及其他媒体的结合,与人物识别的结合,利用人物图像实现智能人机界面等方面的研究,还将更加深入。

目前,用计算机图形学方法生成的人物,与实际中的人已经非常相似。但是仍存在很多不相同的地方,或者说,还有一些与真人不一样的感觉。今后,随着计算机存储器能力的增大,建模技术、造型技术进一步的改进,具有与实物相差无几的 CG 人物的实时生成不会太遥远。但是,这应该还不是最终的目的。我们希望通过简单的接触,就会感觉到动画中登场的人物也具有非常丰富的“人”的气息。现在,人物图像所具有的意义可能还没有完全表述清楚。21 世纪,我们将期待着计算机拥有一张更加生动的脸。

参考文献

- [1] 末永康仁, 間瀬健二, 渡部保日児: “人物像生成技術の動向”, 画像ラボ, pp. 20-25 (1991) (全般)
- [2] “State of the art in facial animation”, SIGGRAPH '89 course notes 22 (1989) (全般)
- [3] “State of the art in facial animation”, SIGGRAPH '90 course notes 26 (1990) (全般)
- [4] N. M. Thalmann: “New trends in the direction of synthetic actors”, CGI '90, pp. 17-35 (1990) (全般, 手, 頭髮)
- [5] E. Catmul: “A system for computer-generated movies”, Proc. ACM Annual Conf., pp 422-431 (1972) (全般, 手)
- [6] F.I. Parke: “A model for human face that allows speech synchronized animation”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 1, 1, pp 3-4 (1975) (顔)
- [7] S.M. Platt and N.I. Badler: “Animating facial expressions”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 15, 3, pp 245-252 (1981) (表情)
- [8] F. I. Parke: “Parametrized models for facial animation”, IEEE Comput. Graph. & Appl., pp 61-68 (1982) (顔)
- [9] K. Waters: “A muscle model for animating three dimensional facial expression”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 21, 4, pp 17-24 (1987) (表情)
- [10] N.M. Thalmann and D. Thalmann: “The direction of synthetic actors in the film rendezvous a montreal”, IEEE Comput. Graph. & Appl., 7, 12, pp 9-19

- (1987) (手, 合成俳優, 動き)
- [11] 伊藤博文: “NHK「驚異の小宇宙・人体」におけるサイエンティフィックビジュアルイゼーション”, NICOGRAPH '89 (1989) (人体)
 - [12] Y. Watanabe and Y. Suenaga: “Two persons”, SIGGRAPH '90 Technical Slide, # 33 (1990) (頭髮; リアルさ)
 - [13] 渡部保日男, 末永康仁: “三角柱と房のモデルによる頭髮像の生成”, 信学論, J73-D-II, 3, pp 367-373 (1990) (頭髮)
 - [14] S. Yoshimoto: “Ballerinas generated by a personal computer”, J. Visualization and Computer Animation, 3, pp. 85-90 (1992) (人体表示; メタボール)
 - [15] N.M. Thalmann and D. Thalmann: “The artificial life of synthetic actors”, 信学論, J76-D-II, 8 (1993) (全般, 合成俳優)
 - [16] T. Akimoto, R.S. Wallace and Y. Suenaga: “Automatic creation of facial model for generating facial images”, MVA '90 (IAPR Workshop on Machine Vision Applications), pp 291-294, Tokyo (1990) (計測)
 - [17] G. Xu, H. Agawa, Y. Nagashima, F. Kishino and Y. Kobayashi: “Three dimensional face modeling for virtual space teleconferencing systems”, Trans. of the IEICE, E73-10, pp. 1753-1761 (1990) (計測)
 - [18] R.A. Javis: “A perspective on range finding techniques for computer vision”, IEEE Trans., PAMI-5, 2, pp. 122-139 (1983) (計測)
 - [19] 井口征士: “三次元センシング技術の現状”, 画像ラボ, 1, 4, pp. 44-47 (1990) (計測)
 - [20] M. Vannier, T. Pilgram, G. Bhatia and B. Brunsden: “Facial surface scanner”, IEEE Comput. Graph. & Appl., pp. 72-80 (1991) (計測)
 - [21] 吉澤 徹: “三次元工学 I — 光三次元計測 —”, 新技術コミュニケーションズ, pp. 48-52 (1993) (計測)
 - [22] L. Williams: “Performance-driven facial animation”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 24, 4, pp. 235-242 (1990) (表情)
 - [23] Y. Suenaga and Y. Watanabe: “A method for the synchronized acquisition of cylindrical range and color data”, MVA '90 (IAPR Workshop on Machine Vision Applications), pp. 137-141, Tokyo (1990) (計測)
 - [24] T. Yasuda, S. Yokoi, H. Ohshita and J. Toriwaki: “3D visualization of an ancient Egyptian mummy”, IEEE Comput. Graph. & Appl., pp. 13-17 (1992)
 - [25] A.H. Barr: “Global and local deformation of solid primitives”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 18, 3, pp 21-30 (1984) (表面記述)
 - [26] T.W. Sederberg and S.R. Parry: “Free-form deformation of solid geometric models”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), 20, 4, pp 151-160 (1986) (表面記述)
 - [27] 小松功児: “キャラクターアニメーションのための人体の曲面モデル”, 情処学論, 29, 1, pp 7-19 (1988) (人体表示)

- [28] 藤代, 茅, 国井: “ボクセル指向3次元データ表現とその表示技術”, 情報学論, **34**, 3, pp. 285-298 (1993) (全般; ポリウムビジュアルライゼーション)
- [29] 西村仁志, 平井 誠, 河合利幸, 河田 享, 白川 功, 大村皓一: “分布関数による物体モデリングと画像生成の一手法”, 信学論, **J68-D**, 4, pp. 718-725 (1985) (表面記述)
- [30] 高沖英二: “メタボールと私”, PIXEL, 77, pp. 76-80 (1989)
- [31] 町田 聡: “メタボールを囲む背景と最新のスーパーボール”, PIXEL, 114, pp. 49-55 (1992) (表面記述)
- [32] 特集: “出揃った各社のメタボール”, PIXEL, 126, pp. 62-72 (1993) (表面記述)
- [33] J.F. Blinn: “A generalization of algebraic surface drawing”, ACM Trans. Graph., **1**, 3, pp. 235-256 (1982) (表面記述; blobby model)
- [34] G. Wyvill, C. McPheeters, B. Wyvill: “Data structure for soft objects”, The Visual Computer, **2**, pp. 227-234 (1986) (表面記述; soft object)
- [35] Shigeru-Muraki: “Volumetric shape description of range data using blobby model”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), **25**, 4 (1991) (表面記述)
- [36] D. Zeltzer: “Motor control techniques for figure animation”, IEEE Comput. Graph. & Appl., **2**, 9, pp. 53-59 (1982) (動き)
- [37] J.E. Chadwick, D.R. Haumann and R.E. Parent: “Layered construction for deformable animated characters”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), **23**, 3, pp. 243-252 (1989) (動き)
- [38] “The making of brilliance”, SIGGRAPH Video Review, 20 (1985) (動き)
- [39] M.W. Lee and T.L. Kunii: “Animation A database-oriented animation design method with a video image analysis capability”, CGI '89 (1989) (動き)
- [40] P. Kalra, A. Mangili, M. Thalmann and D. Thalmann: “A multi-layered facial animation system”, T.L. Kunii ed., Modeling in Computer Graphics, pp. 189-198, Springer, Tokyo (1991) (人体表示)
- [41] M. Girard and A.A. Maciejewski: “Computational modeling for computer generation of legged figures”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), **19**, 3, pp. 263-270 (1985) (動き)
- [42] A. Witkin and M. Kass: “Spacetime constraints”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), **22**, 4, pp. 159-168 (1988) (動き; 物理モデリング)
- [43] A. Brudemlin and T.W. Calvert: “Goal directed, dynamic animation of human walking”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), **23**, 3, pp. 233-242 (1989) (動き)
- [44] J.-P. Gourret, N. M. Thalmann, D. Thalmann: “Simulation of object and human skin deformations in a grasping task”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), **23**, 3, pp. 21-30 (1989) (手)
- [45] H. Rijkema and M. Girard: “Computer animation of knowledgebased human grasping”, Comput. Graph. (SIGGRAPH), **25**, 4, pp. 339-348 (1991) (手)

- [46] T. Chen and D. Zeltzer: "Pump it up: Computer animation of a biomechanically based mode of muscle using the finite element method", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **26**, 2, pp. 89-98 (1992) (筋肉)
- [47] 秋本高明, 間瀬健二, 末永康仁: "形状の自動変形による表情を持つ顔画像の生成方法の検討", 情処研資, 28-CG-14 (1987) (顔, 表情)
- [48] 小松功児: "アニメーション制作のための顔の曲面モデル", 情処学論, **30**, 5, pp. 633-641 (1989) (顔)
- [49] 横井茂樹: "手術シミュレーター", 計測制御, **28**, 7, pp. 629-632 (1989) (頭部)
- [50] 秋本高明: "あごの 3 次元モデルと表皮の自動変形による表情と動きを持つ顔画像の生成", NICOGRAPH'86, pp. 207-213 (1986) (表情)
- [51] P. Ekman and W.V. Friesen: The facial action coding system, Consulting Psychologists Press, Inc., San Francisco, California (1978) (表情)
- [52] S. Pieper: "Physically-based animation of facial tissue", SIGGRAPH'89 course note # 22 [1]. (1989) (表情)
- [53] 山名岳志, 末永康仁: "関数制御型異方性反射モデルを用いた頭髮の質感表現", 信学論, **J73-D-II**, 6, pp. 880-886 (1990) (頭髮)
- [54] A. Pearce, B. Wyvill, G. Wyvill and D. Hill: "Speech and expression: a computer solution to face animation", Graphics Interface '86 pp. 136-140 (1986) (表情, 頭髮)
- [55] 小林誠司, 森島繁生, 原島 博: "糸状物体の質感及び運動の表現", NICOGRAPH '90, pp. 29-36 (1990)
- [56] 中嶋正之, 三輪喜良, 安居院猛: "確率モデルによる頭髮の動き表現", 信学技報, **IE89-60** (1989) (頭髮)
- [57] 安居院猛, 三輪喜良, 中嶋正之: "確率モデルを用いた頭髮の動きのコンピュータアニメーション", 情処学論, **32**, 6, pp. 749-755 (1992) (頭髮)
- [58] 安生健一, 宇佐美芳明, 栗原恒弥: "3 次元コンピュータグラフィックスによる頭髮表現", グラフィクスと CAD シンポジウム, 情処学, pp. 127-134 (1991) (頭髮)
- [59] 宇佐美芳明, 安生健一: "曲げ剛性を利用した頭髮のモデリング", 情処学論, **33**, 5, pp. 746-755 (1992) (頭髮)
- [60] K. Anjo, Y. Usami and T. Kurihara: "A simple method for extracting the natural beauty of hair", Comput. Graph. (SIGGRAPH), **26**, 2, pp. 111-120 (1992) (頭髮)
- [61] 大口孝之, 奥澤泰治, 上田明彦: "力学計算による, 頭髮のアニメーション表現", NICOGRAPH'92 論, pp. 93-102 (1992) (頭髮; アニメ)
- [62] 秋本高明, 末永康仁: "頭部の正面, 側面像と基本 3 次元形状を用いた顔面像生成手法", 信学技報, **PRU88-47** (1988) (顔, 計測)
- [63] 相沢清晴, 原島 博, 斎藤隆弘: "構造モデルを用いた画像の分析合成符号化方

- 式”，信学論，J72-B-I, 3, pp. 351-359 (1989) (顔)
- [64] 石井智海，倉地忠彦，安田孝美，横井茂樹，鳥脇純一郎：“ボロノイ分割を利用した皮膚表面の質感表現”，NICOGRAPH '90, D-542, pp. 58-65 (1990) (皮膚)
- [65] 石野喜信：“膚の反射スペクトルに及ぼす照明及び測定角度の影響”，1990 信学春季全大，D-542 (1990) (皮膚)
- [66] 石井智海，安田孝美，横井茂樹，鳥脇純一郎：“表面の微視的構造に注目した皮膚の光反射モデル”，NICOGRAPH '91, pp. 68-76 (1991) (皮膚)
- [67] 石井智海，安田孝美，横井茂樹，鳥脇純一郎：“表面の微細形状に注目した皮膚の質感表現の一手法”，情処学論，32, 5, pp. 645-654 (1992) (皮膚)
- [68] 今岡春樹：“服地，布の生成に関する研究動向”，情処研資，CG40-14 (1989) (服地，布，全般)
- [69] M. Carignan, Y. Yang, N. Thalmann and D. Thalmann：“Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes”，Comput. Graph. (SIGGRAPH), 26, 2, pp. 99-104 (1992) (服地，布)
- [70] T. Yasuda, S. Yokoi and J. Toriwaki：“A shading model for cloth objects”，IEEE Comput. Graph. & Appl., pp. 15-24 (1992) (服地，布)
- [71] G. Miller：“From wire-frames to furry animals”，Graphics Interface '88, pp. 138-145 (1988) (毛皮)
- [72] J.T. Kajiya and T.L. Kay：“Rendering fur with three dimensional textures”，Comput. Graph. (SIGGRAPH), 23, 3, pp. 271-280 (1989) (毛皮)
- [73] D.R. Hill, A. Pearce and B. Wyvill：“Animating speech: an automatic approach using speech synthesized by rules”，The Visual Computer, 3, pp. 277-289 (1988) (表情：発声)
- [74] 森島繁生，岡田信一，原島 博：“知的インタフェースのための顔の表情合成法の一検討”，信学論，J73-D-II, 3, pp. 351-359 (1990) (表情：発声)
- [75] J.P. Lewis and F.I. Parke：“Automated lip-synch and speech synthesis for character animation”，CHI+GI'87, pp. 143-147 (1987) (表情：発声)
- [76] 森末映史，津田俊隆，松田喜一：“音声情報に基づいた口の動画像生成に関する一検討”，信学技報，CS87-130 (1987) (表情：発声)
- [77] 間瀬健二，渡部保日児，末永康仁：“リアルタイム頭部動作認識合成システム”，PCSJ'89, pp. 127-128 (1989) (動作検出表示)
- [78] D. Terzopoulos and K. Waters：“Analysis of facial images using physical and anatomical models”，ICCV'90, pp. 727-732 (1990) (表情：物理モデリング)
- [79] 福本雅朗，間瀬健二，末永康仁：“動画像処理による非接触ハンドリーダ”，第7回 HI シンポジウム (1991) (動作検出表示)
- [80] 末永康仁，間瀬健二，福本雅朗，渡部保日児：“Human Reader：人物像と音声による知的インタフェース”，信学論 (D-II), J75-D-II, 2, pp. 190-202 (1992) (インタフェース)

- [81] 坂口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫: “仮想服飾環境 PARTY - 衣服形状計算における, 衣服と人体との衝突計算方法”, 信学論(D-II), **J78-D-II**, 3, pp. 483-491 (1995)
(衣服, 仮想環境)

第9章

计算机动画

计算机动画所涉及的技术范围非常广泛,在三维计算机图形学所采用的方法中,也有许多作品同时采用了原来的二维计算机图形学技术。像迪斯尼动画片这类用计算机作为辅助设计的手段进行开发的作品就非常多。

这里,就计算机动画技术进行概述的同时,介绍实际影像制作中所采用的具有代表性的方法。并对三维计算机图形学中所特有的变形方法,以及人物等复杂的三维形状的变形方法中,正成为研究热点的机器人工程技术方面应用的主要方法进行介绍。

9.1 计算机动画的概述

动画这个术语来源于英语中的“animate”,即有生机,有活力的意思。手冢治虫的“铁臂阿童木”、迪斯尼的“唐老鸭”等,不仅仅是在日本,在世界各地都成为孩子们所喜欢的形象,与现实生活有着密不可分的关系。

在利用计算机技术制作的动画片中,具有代表的技术主要可分为两种方式。其中之一是,在称为单元(cell)的透明胶片上,将动作或运动连贯地,一点一点的变化状态绘制下来,再与背景部分重叠后,一帧帧地进行拍摄所得到的动画片,称这类动画片为单元动画片。另一种方式是,使用关节与真人相同的,可以弯曲的假人或是模型集合,对其手脚一点一点的动作进行拍摄的方式,称之为木偶动画。无论哪一种动画片,其制作过程都是首先绘制动画片中每一帧中的场景,之后对每帧都进行拍摄。将这样的操作反复进行,就可以制作出动画片了。因为制作好的帧

是进行连续播放的,所以在制作上需要庞大的时间及人力资源。

计算机动画片的制作技术也分为两个方面,一种是将上面所介绍的传统的动画片的制作过程用计算机来辅助完成,这样既可以缩短制作周期,又可以节省经费,这类系统称为辅助系统;另一种是利用计算机图形学方法,直接从数值型数据生成动画片的系统,称之为生成型系统。这两类系统并行发展,并且相互影响。

如果将计算机动画片的制作方法进行分类的话,可以按照所表示的对象不同,分为特性动画,以及表示火焰、海浪等的动画,但是要对其进行准确的分类,则是非常困难的。如图 9.1 所示,坐标系的纵轴表示计算机处理的内容是具有一定空间广度的三维对象,还是限定在平面上的二维对象,横轴则表示制作所需要的素材的维数以及各种动画生成系统和工具。这里,主要对辅助型系统以及生成型系统的基本方法进行说明。

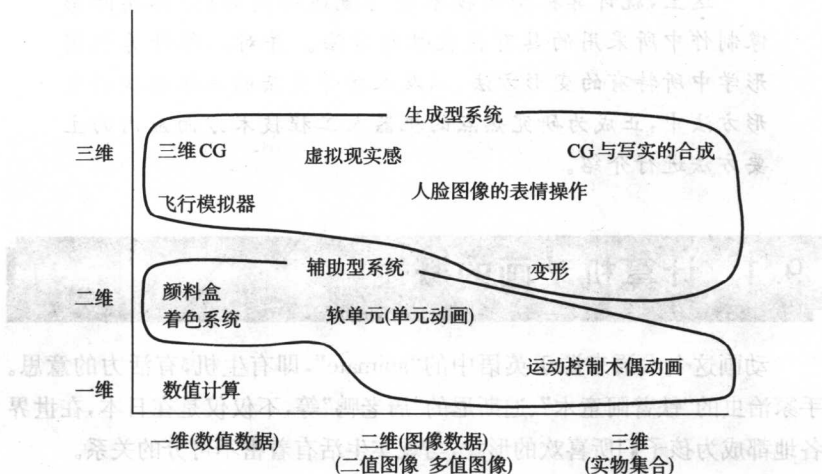


图 9.1 动画片技术与应用

9.2 辅助型系统

辅助型系统包括了称为软单元的单元动画片系统,所谓的软单元是指在帧缓存上,进行电子绘图的方式。同时还包括了用计算机对云台或相机的运动进行控制的控制装置。用软单元方式制作二维动画,

主要使用绘制系统,用自动着色技术以及形状变化技术来实现动画片的制作。此外,对实景拍摄的影像,进行被称作变形处理的操作后,获得变形的影像效果,也可以用二维动画片系统来制作。

这里,将介绍除二维计算机图形学绘制系统以外的具有代表性的方法。

☆ 1. 关键帧方法^[1]

关键帧方法是为了提高手工绘制单元动画片的制作效率而研究出的方法。对一个人的关键动作,在称为**关键帧**的画面上,将动作的主要变化点进行描绘,在参考这个画面的同时,按照不失真的原则确定两个相邻关键帧之间插入的中间帧(InBetweening)的帧数,将多个辅助动作绘制在这些中间帧画面上。这种操作并行地,反复地进行的制作方法,称为关键帧方法(参见图 9.2)。

计算机动画片的制作中,关键帧方法可以在两种含义下使用。其中之一是,可以作为场景随时间变化的表示方法来使用。这时,该方法的设计思想是只将特征场景指定为关键帧。另一种含义下的使用方法是,将基于动力学方法所生成的动作,或者是基于行动模型所生成的鸟群运动等,与随时间变化的场景变化相吻合,自动生成动画片的方法。从其狭义的含义上理解,关键帧方法是指由两个相邻的关键帧,通过线性内插值方法,自动生成中间帧图形的内插值方法,称这种方法为 InBetweening 方法^[2]。

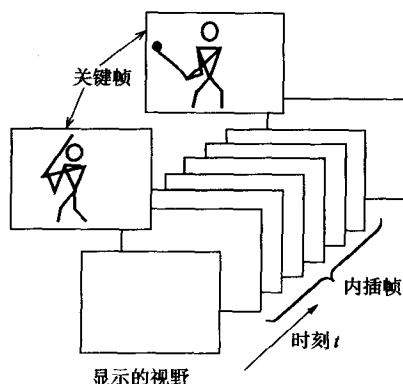


图 9.2 基于关键帧的动作的制定

图形内插方式的关键帧法如图 9.3 所示,将用线条图形描述的关键帧图形,根据图形的复杂性,用多边形来近似。确定两个相邻关键帧的对应顶点,用式(9.1)给出的线性内插值公式,可以求出中间帧图形的顶点坐标,将顶点连接,就可以获得中间帧的图像。

$$P_{ji} = (P_e - P_s) * j/m + P_s \quad (9.1)$$

式中, P_s 为初始关键帧的顶点, P_e 为终止关键帧的顶点, P_{ji} 为第 j 帧(中间帧)的顶点, m 为中间帧的帧数。

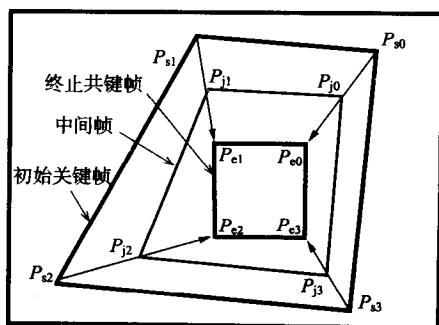


图 9.3 基于关键帧法的图形变形

当图形比较复杂时,顶点的个数就会增加,由此,确定关键帧间的顶点之间对应关系的操作也就变得复杂。此外,由于图形旋转所导致的变形,也容易产生不自然的变形。

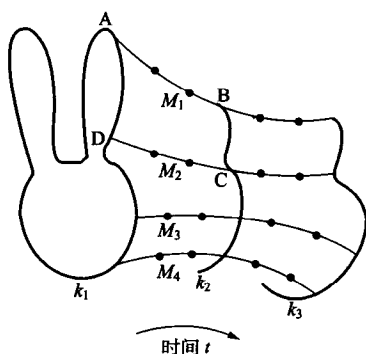


图 9.4 动点约束法

★ 2. 动点约束法^[2]

动点约束法是一种确定用关键帧法生成的中间帧图形的更加精细的动画制作方法。该方法可以同时确定对应点的变化轨迹及其变化时间。如图 9.4 所示, k_1, k_2, k_3 是各关键帧中的对象图形, M_1, M_2, M_3, M_4 是对应点的运动曲线(轨迹)。运动曲线上的“·”表示中间帧的定时时刻。首先,在由顶点 A, B, C, D 包围的二维区域上,计算一致的 Coons 段。Coons 段是用两个变量表示的

的二维区域上,计算一致的 Coons 段。Coons 段是用两个变量表示的

参数。中间帧图形随时间的变化,用与之相对应的变量表示,与事先确定的定时时间相吻合,改变其他的变量求出所得到的曲线。

利用这种方法,可以减少对应点的确定,也可以自由地设定中间帧图形的形状及其变化的速度。

★ 3. 骨骼法^[3]

所谓的骨骼法,是将复杂的图形简单化,定义形成变形基准的骨骼,根据骨骼之间对应的位置关系来确定图形的变化。中间帧图形如图 9.5 所示,用关键帧法求出骨骼的变化,根据骨骼的变化,获得图形的变化。

用这种方法,需要确定图形与骨骼,但是因为只需要确定相互间顶点的对应关系,所以可减少其计算量,并且可以比较容易地实现人物或者动物的较为剧烈的运动。

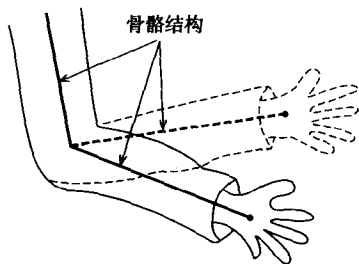


图 9.5 骨骼法

★ 4. 变形方法^[4]

变形方法常用来描述从物体 A 向物体 B 转换时,形状与颜色同时变化的视频。“变形”(morphing)术语是从 metamorphosis 派生出来的。变形方法原意是指使物体变形的方法。在这里,是指将预先存储的视频作为素材进行处理的方法。所得到的结果视频与用 metamorphosis 处理得到的结果相似,但在处理技术上则存在非常明显的差异。

该方法如图 9.6 所示,将物体 A 和物体 B 在表示平面上进行匹配,使之一致,将各自所在的平面在这个平面上进行局部缩放,使视频中的物体形状发生改变的同时,将变形后的两个视频信号渐隐或擦除,从而实现从物体 A 到物体 B 的影像切换。这时的匹配方法,比较多的是利用自由曲面。在实际操作时,多数的情况是,物体 A 和物体 B 都是利用动画来进行描述的,在指定每帧中的变形程度和影像切换状况的同时,以动画形式实现平滑的变换。实际应用中,多是采用这种具有庞大工作量的操作方式。素材在摄影阶段的整合性是其关键点。

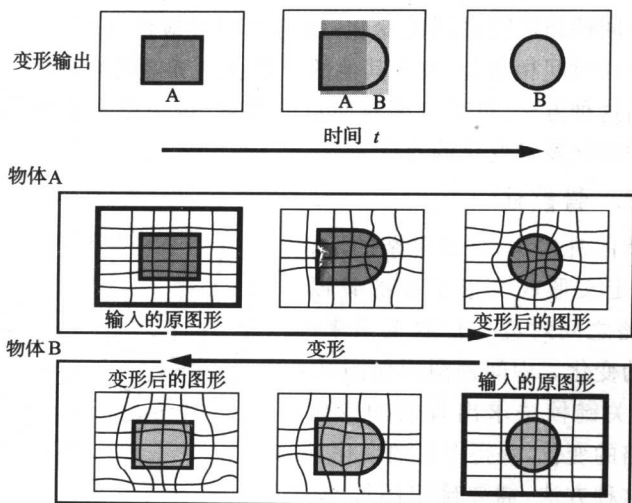


图 9.6 采用擦除方式的变形

★ 5. 运动控制系统

运动控制系统的一个示例如图 9.7 所示,在移动轨道上的微型起重机上放置一个摄像头,用计算机控制马达驱动该微型起重机的运动。

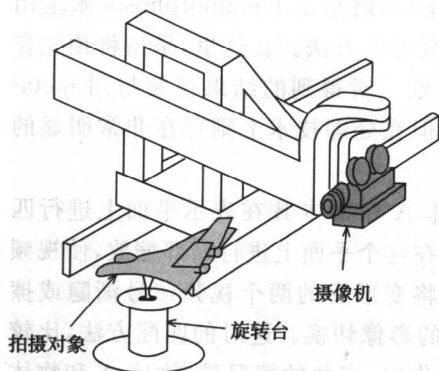


图 9.7 运动控制系统

这个系统还可以规定在由计算机控制的旋转台上所放置的被拍摄对象微型飞机与摄像头的相对关系。如果驱动数据不变,则该系统具有可以在多次拍摄中获得相同的画面,以及可以修正镜头的一个部分等非常突出的优点。同样,在宇宙飞船上的摄影中,使摄像机随着被拍摄物体的移动而进行相对的移动的方式,可以获得效果更好的影像。这种方法在 SF 电影中用得比较多。

9.3 生成型系统

在用三维计算机图形学方法制作的动画片中亮相的物体中,随着时间的变化,其形状和位置也发生变换的对象,如表 7.1 所示,包括动物、自然景观、人造物体等。人造结构物体的形状变化比较简单,只要采用适当的函数进行描述,就可以实现。但是包括草木在内的自然现象的变化则非常复杂,要进行统一的描述是非常困难的,所以只能针对不同的对象采用不同的算法。因为有关这部分的讨论已经在第 7 章中介绍了,所以在这里,只就一般物体的变形方法以及多关节结构体的变形方法进行介绍。

★ 1. 函数法

表示摄像机的移动或者是物体运动的基本方法之一,就是利用基于数学表达式、数据列表、程序等函数的方法来实现。

除可以简单表示的直线运动、旋转运动之外,用样条函数近似任意曲线的方法也被广泛使用。为了可以自由地控制运动速度,求出曲线的长度,以及距曲线上的点一定距离的位置是非常重要的。可以用二次 B-样条函数获得解析解^[6]。

★ 2. 自由形状的变形(FFD:Free Form Deformation)

Sederberg 等人提出了自由形状的变形方法,对三维物体进行平滑的变形^[7]。如图 9.8 所示,这种方法的设计思想是,将需要变形的三维物体用一个平行六边形围起来,之后对这个平行六边形的各个边,以适当的间隔进行分割,移动各个分割点,将被这些分割点所包围的空间进行变形,其内部的物体也随之变形。

该方法可以将二维图像在自由曲面上进行匹配的方法扩展到三维。采用二维的匹配方法,将二维平面上的纹理图像用自由曲面的参数平面替代,即可对应三维空间中曲面上的点。将这种设计思想扩展到三维,用参数 (s, t, u) 表示的三维自由形状的体素中的点 X ,设控制点为 P_{ijk} ,则点 X 可由下式求:

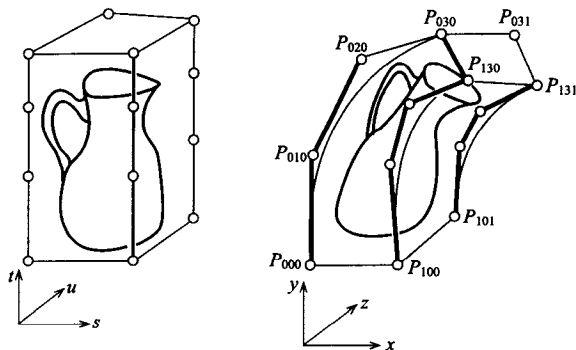


图 9.8 自由形状的变形

$$X(s, t, u) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n B_{i,t}(s) \cdot B_{j,m}(t) \cdot B_{k,n}(u) \cdot P_{ijk}$$

$$B_{i,n}(u) = {}_nC_i (1-u)^{n-i} \cdot u^i \quad (9.2)$$

变形前的三维体素 (s, t, u) , 可以影射到由控制点 P_{ijk} 生成的自由形状的体素 V 上。移动控制点 P_{ijk} , 原来的平行六边形就变形成图 9.8 所示的六边形。这种方法可以作为立体建模方法, 在多面体及自由曲面的描述中使用。在定义多面体模型的时候, 变形前的顶点的位置坐标设为 (s, t, u) , 变形后相同顶点的坐标可由式 (9.2) 计算得出。

基于 FFD 的变形特征是, 将图形的整体变形, 看起来好像是由橡皮气球所做的立体物的变形。

★ 3. 多关节结构体的变形

一般在动画片中出现的有动作的物体, 除了人物、动物之外, 还有对其他非生命物体的拟人化表现。在操作这些运动、动作时, 大多数的情况是, 将物体的形状用骨骼方法进行描述, 之后对该骨骼多关节结构体进行变形处理。这样, 变形处理的问题就变成指定各关节角的变化, 以及关节位置移动的操作。用多关节结构建模的装置或物体的变形及运动, 在机器人领域中有比较广泛的研究, 作为运动学或动力学的分析也不断深入, 并且应用在动画片的制作中。

(1) 关节角的关键帧方法 在二维动画的制作技术中所介绍的关键帧方法, 适用于各个关节部分的旋转角。根据两个关键帧中各个关节角度, 可以通过线性内插方法, 获得中间帧中物体的形状。由此

便可以比较容易地再现自然的动作。但是,对于手、脚的运动轨迹,则会出现不太自然的情况。这是因为,在步行时需要考虑地板与脚的关系,手作业时需要考虑手与桌子之间的关系,而对比进行合理的控制是非常困难的。

(2) 动作函数 为了对人体频繁使用的基本动作函数来建模,首先从实景中的实际动作所拍摄的录像中,检测出关节或头部位置的移动量,之后可以采用如下所示的一般式来计算^[8]。

$$x = \tan(\theta \cdot t) + a \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{b}(t+c)\right] + d \quad (9.3)$$

$$y = a' \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{b'}(t+c')\right] + d' \quad (9.4)$$

式中, t 为时刻, $a, a', b, b', c, c', d, d'$ 为动作参数。

此外,在求不依赖于体型的动作目标物的动作函数时,可用正弦曲线或直线来近似各个关节的变化^[9]。

(3) 运动学 因为采用运动学可以确定具有链接结构的物体的关节,以及端点位置与关节旋转角之间的关系,所以该问题在工业用机器人的设计以及运动分析领域中研究。

将运动学引入动画片的制作方法中,可以通过对关节或端点位置的操作,实现姿势、动作的确定^[10,11]。只要确定了端点的位置,就可以自动生成与之相关的多个关节的旋转角,适用于人机对话型处理的实现。

① 前向运动学(forward kinematics)。已知关节角,求各关节或端点位置的问题称为前向运动学。以图 9.9 所示的简单的链接结构为例进行说明。首先,在全局坐标系中,设链接结构中的点 O_0 为坐标原点。如图所示,设置各个坐标轴的方向,在各链接结构的端点处定义局部坐标系。臂的端点定义为局部坐标系 Σ_2 的原点 O_2 。这时,前向运动学问题是,将在全局坐标系 Σ_0 中检测到的点 O_2 的坐标值(0O_2 (${}^0x_2, {}^0y_2, {}^0z_2$)),用关节角($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)的函数来表示的问题。

将坐标系 Σ_2 中表示的点,变换到坐标系 Σ_1 中的坐标值的坐标变换矩阵 T_2 可以表示为,平移到点 O_1 上的平移矩阵与围绕 y 轴旋转 θ_1 角度的旋转矩阵的乘积。

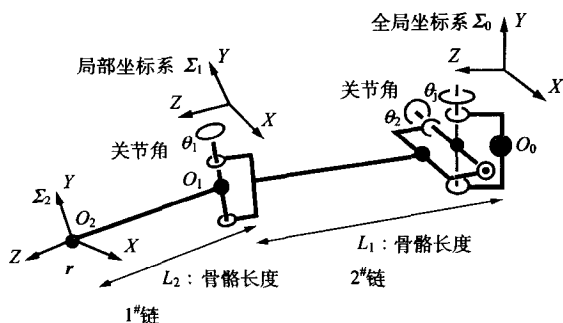


图 9.9 骨骼模型与坐标系

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.5)$$

同理,可以求出坐标系 Σ_1 到全局坐标系 Σ_0 的坐标变换矩阵(0T_1)。由此,坐标系 Σ_2 到全局坐标系 Σ_0 的坐标变换矩阵(0T_2)可以用下式求出, 0O_2 表示 0T_2 的第四列元素。

$$\begin{aligned} {}^0T_2 &= {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \\ {}^0O_2 &= {}^0T_2 \cdot O_2 \\ {}^0O_2 &= \begin{bmatrix} F_x(\theta_1, \theta_2, \theta_j) \\ F_y(\theta_1, \theta_2, \theta_j) \\ F_z(\theta_1, \theta_2, \theta_j) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9.6)$$

各个矩阵的元素可以由式(9.5)类推,因为是关于关节角($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)的函数,所以可由式(9.7)表示。式(9.7)是由关节角求臂端点位置坐标的前向运动学的公式。

$$r = F(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_j) \quad (9.7)$$

② 逆向运动学(inverse kinematics)。前向运动学是用关节的旋转角计算臂端点位置的表示方法。当已知臂端点的位置时,求各关节旋转角度的问题就称为逆向运动学。

在制作动画片的时候,指定对应于臂端点位置的手端点和脚端点位置及其运动路径,可以计算出实现预先设定的手、脚运动方式的各

关节的旋转角度。用表示手端点的少量数据,可以自动地计算出与之相关的关节角的方法,是动画片制作中的一种有效方法。

逆向运动学的问题,就是求式(9.7)中函数 F 的反函数的问题。 F 是可微分的非线性函数,用解析的方法不容易获得其反函数。所以不能从表示手端点位置的绝对值(坐标值)直接求出所有关节角的绝对值。

因此,可以将式(9.7)对时间求微分(速度分解法),使其线性化。这实际上就是对人类姿势中的状态,以及这个状态与经过微量的时间之后状态的关系进行定义,动画片的制作如图 9.10 所示。因为求出每帧中的关节角度是其制作的目的,所以可以转换成相邻帧之间的角度变化问题来进行讨论。

线性化后的式(9.7),可以用各关节角的偏微分后得到的雅克比矩阵 J 按下式表示函数 F 。

$$\begin{aligned}\delta r &= J \cdot \delta \theta \\ \delta \theta &= [\delta \theta_1, \delta \theta_2, \dots, \delta \theta_i]'\end{aligned}\quad (9.8)$$

当 J 为可逆矩阵时,反函数可用 J 的逆矩阵 J^{-1} 表示。

$$\delta \theta = J^{-1} \cdot \delta r \quad (9.9)$$

由式(9.9)可知,从相邻帧之间所期望的臂端点位置(手端点等)的变化,可以计算出实现这一变化的关节角度的变化量。

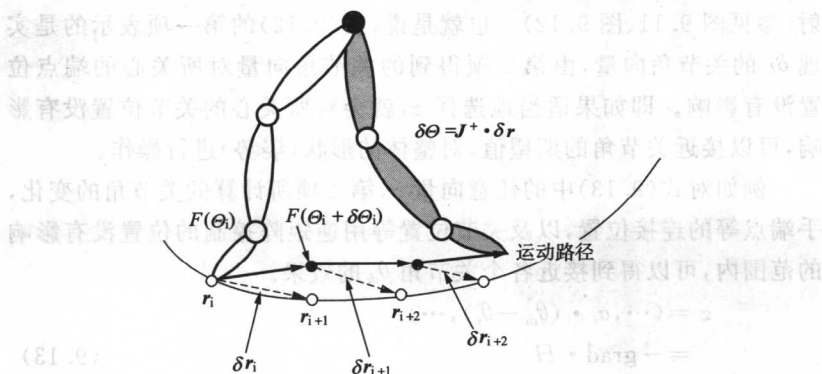


图 9.10 沿着运动路径的动作的生成

工业用机器人中, J 一般为可逆的,而在人物的动画片中,有许多时候 J 不为方阵。例如从肩到手端点的这个部分,关节的自由度为 7,

θ 是 7 维的向量,手端点的位置 r 是三维的向量,这样, J 就是一个 3×7 的矩阵。换句话说,要由三个条件确定七个未知数。这时,只要附加一些条件就可以求解。以关节角变化量的平方和作为评价函数(W),附加使其最小化的条件,求式(9.7)的逆矩阵,如下式所示:

$$W = \delta\theta_1^2 + \delta\theta_2^2 + \cdots + \delta\theta_7^2 \quad (9.10)$$

$$\delta\Theta = J' \cdot (J \cdot J')^{-1} \cdot \delta\gamma \quad (9.11)$$

$$J' \cdot (J \cdot J')^{-1} \rightarrow J^+ \quad \text{广义逆矩阵}$$

式(9.11)中 δr 的系数用称为广义逆矩阵的 J^+ 表示,当 J 为可逆方阵时, J^+ 与 J^{-1} 一致。

如果用 J^+ 来替代 J^{-1} 的话,即使是非常冗长的子系统,也可以求出逆向运动学的解。但是,值得注意的是,式(9.11)只是无穷多组解中的一个特解,这个解未必可以生成所期望的动作。

③ 广义逆矩阵的一般解。对于冗长系统,实现期望端点位置变化量的关节角的组合有无穷多个,其通解可以用下式表示:

$$\delta\Theta = J^+ \cdot \delta r + (I - J^+ \cdot J) \cdot z \quad (9.12)$$

式中, z 为与关节角相同维数的任意向量, I 为与关节角相同维数的单位矩阵。

式(9.12)的第二项的括号中,是广义逆矩阵(J^+)的正交映射矩阵,是作用在任意向量(z)上所得到的关节角向量,是 J 向零空间的影射(参见图 9.11、图 9.12)。也就是说,式(9.12)的第一项表示的是实现 δr 的关节角向量,由第二项得到的关节角向量对所关心的端点位置没有影响。即如果适当地选择 z ,就会对所关心的关节位置没有影响,可以接近关节角的期望值,对整体的形状(姿势)进行操作。

例如对式(9.13)中的任意向量 z ,第二项所计算的关节角的变化,手端点等的连接位置,以及关节位置等用逆矩阵控制的位置没有影响的范围内,可以得到接近各个关节角 θ_{di} 的效果。

$$\begin{aligned} z &= (\cdots, \alpha_i \cdot (\theta_{di} - \theta_i), \cdots) \\ &= -\text{grad} \cdot H \\ H &= 1/2 \sum \alpha_i \cdot (\theta_{di} - \theta_i)^2 \end{aligned} \quad (9.13)$$

式中, α_i 为加权系数。

(4) 动力学(dynamics) 动力学仿真是指确定引起运动或变形

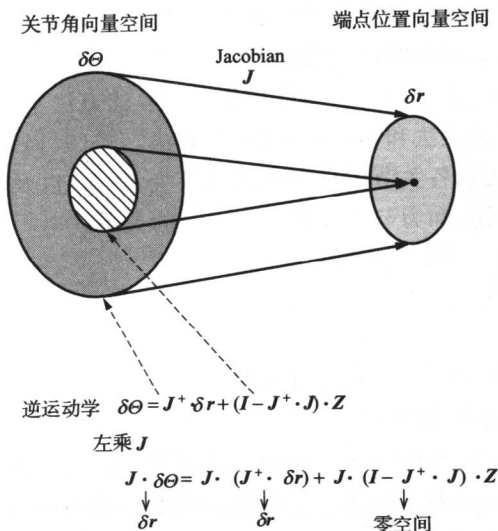


图 9.11 广义逆矩阵的一般解

的力或转矩,用力或转矩来表示物体随时间的变化,即计算出重心的加速度,围绕轴的旋转加速度,在连续帧中自动地确定图形的变化量。如果动作主体是简单的球体或正方体,并且确定动作的力只有外力,则根据 Newton-Euler 方程,就可以比较简单地计算出来。

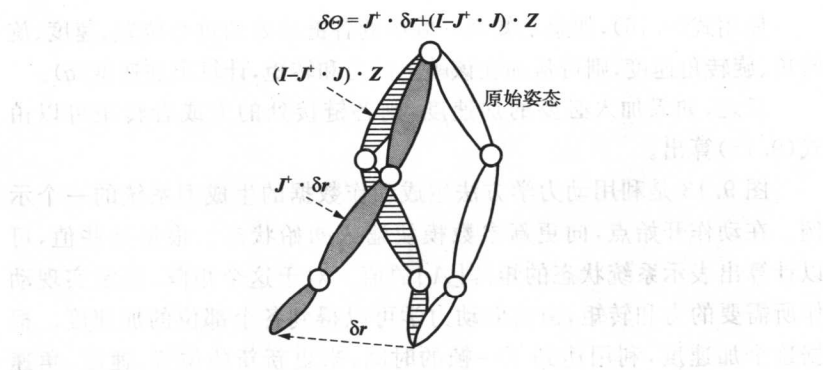


图 9.12 广义逆矩阵的一般解的性质

具有骨骼结构的系统就没有那么简单了。在各个骨骼上除了重力等外力之外,驱动骨骼间的转矩会改变相互间的位置关系,由此会

改变关节的角度。在这种运动的解析中,可以应用对机械手进行适当控制的机器人工程学的研究成果^[12,13]。

在对具有骨骼结构的运动进行分析流程的方法中,通常所使用的是拉格朗日函数方法和 Newton-Euler 方法。式(9.14)是用拉格朗日函数方程式,表示各关节的自由度的关节变量(q_i)以及在这个关节上所加的关节转矩,和力与广义化的力(Q_i)的关系。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (9.14)$$

$$i=1, 2, \dots, n$$

$L = T - V$: 拉格朗日函数

式中, T 为动能, V 为势能。

只要动能(T)及势能(V),能够用各关节上固定坐标系上所表示的惯性矩阵和静止坐标系的坐标变换矩阵来确定,就可以求解上式。求解系统整体的方程式,可以得到如下逆向动力学(inverse dynamics)。

$$[A] \cdot [\ddot{q}] = [B] \quad (9.15)$$

式中, $[A]$ 为质量矩阵(质量,惯性矩), $[\ddot{q}]$ 为广义化的加速度向量(加速度,角加速度), $[B]$ 为广义化的向量(力,转矩)。

如果系统是可逆的,则前向动力学(forward dynamics)可由下式得到。

$$[\ddot{q}] = [A]^{-1} \cdot [B] \quad (9.16)$$

使用式(9.16),如果已知某一帧中的各链接处的重心位置、速度、旋转角、旋转角速度,则可从加在该帧上的力和转矩,计算出加速度(\ddot{q})。

反之,如果加入必要的加速度,则各链接处的力或者转矩可以由式(9.15)算出。

图 9.13 是利用动力学方法生成动作数据的生成型系统的一个示例。在动作开始点,向更新参数模块输入初始状态。根据这些值,可以计算出表示系统状态的矩阵 $[A]$ 的值。对于这个矩阵,制定实现动作所需要的力和转矩,由前向动力学可以得到各个部位的加速度。根据这个加速度,利用达到下一帧的时间,来更新新的位置、速度、角速度等参数,进入到下一帧数据的制作。

在这个系统中,动作的速度,以及生成什么样的动作等,可以根据预先输入的力或转矩来进行操作。然而,有时实现的动作是出乎意料

的,有时则计算出的关节旋转角超出了其旋转范围。因此,可以利用对指定的力和转矩进行修正的方法使逆向动力学的公式满足各种约束条件。

该方法虽然具有可利用反映骨骼结构的运动方程式,直接计算出加速度、角速度的优点,但对于人体等具有复杂骨骼结构的系统,为了使各骨骼的驱动力正确地反映对整体运动的影响,其计算量是相当庞大的。

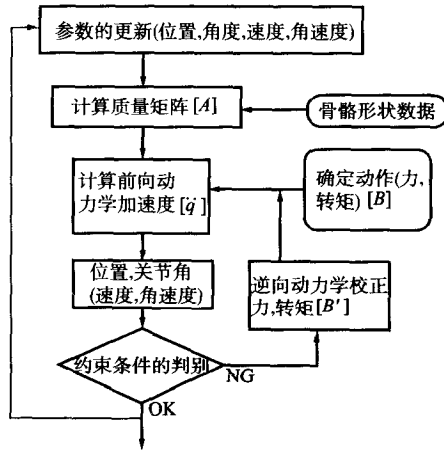


图 9.13 基于动力学的动画片制作系统

(5) 动力学方法的快速化 下面,我们来讨论使用动力学时,减少正确动作仿真计算时间的方法^[14]。

该方法如图 9.14 所示,取代链接结构的整体运动方程式的求解,对各个链接处分别计算其运动方程式(牛顿第二定理和欧拉方程),使实现动作的一般化的力分别作用在各个链接处。求出重心的加速度,角速度。虽然计算简单可以达到计算的快速化的目的,但各骨骼之间由关节链接,使原来固定的个数等约束条件被破坏。因此,在下面的步骤中,需要求出满足原来约束条件的驱动各个部位所需要的一般力,来修正所确定出的力的大小。具体地说,就是从所得到的一般化的加速度,计算出各个链接处的移动量和旋转量。根据这个值,利用逆向动力学的公式,将这个操作不断循环处理,直到满足约束条件。将这个操作在各个链接处,朝着起点的链接点依次进行。

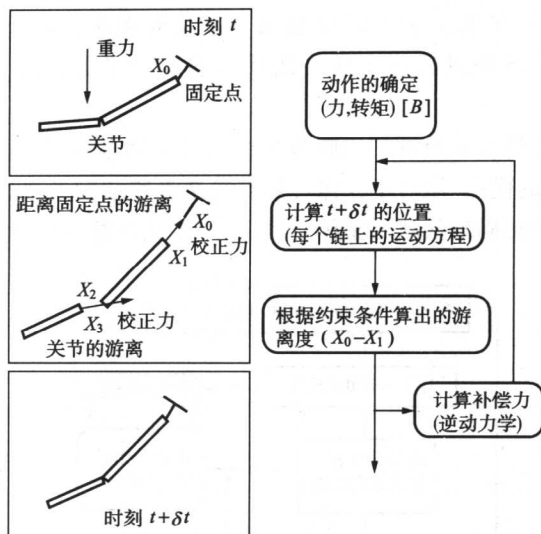


图 9.14 快速化的动力学方法

实际处理的实例中,有报告称可改善前述 4 中的处理时间^[14]。

运动学及动力学方法,都是源于工业机器人设计技术的应用。在机器人的设计中,为了实行所确定的动作,使用逆动力学,计算正确驱动设置在各个关节位置上马达的转矩是其主要目的。而作为动画片制作技术的主要应用目的是,生成符合物理法则的自然动作。为此,机器人工程技术的直接应用已经失去了其原来的目的,这一点值得注意。

9.4 实用系统的现状与未来

影像作品的品质取决于受造型方法影响的静止画面和运动画面的品质。动画片技术是影像制作中非常重要的技术之一。但是非常遗憾的是,市场上卖的工具与其说是生成动作数据的辅助系统,不如说是对所生成的动作数据进行确定的系统,几乎所有的工具都是用关键帧法组合形成的。因此,在实际的制作中为了获得合适的动作而进行的操作非常繁琐,而且数据量也非常庞大,所以期望开发出有效的动画片制作技术。

在图像生成技术方面,在未来的一段时期内,用拍摄现实世界的影像制作方法所得不到的影像,以及根据剧情等可以自由控制并生成相应的影像是将要考虑的一个重要因素,支撑这项目标的动画片技术正在飞速的发展之中。

参考文献

- [1] N. Burtnyk and M. Wein : "Computer Generated Key Frame Animation", SMPTE 80, pp. 149-153 (1979)
- [2] W. Reeves : "Inbetweening for Computer Animation Utilizing", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 15, 3, pp. 263-269 (1981)
- [3] N. Burtnyk and M. Wein : "Interactive Skelton Techniques for Enhancing Motion Dynamics in Key Frame Animation", ACM Commun., 1-19, 10, pp. 564-596 (1976)
- [4] A.R. Smith : "Planar 2-Pass Texture Mapping and Warping", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 21, 4, pp. 263-272 (1987)
- [5] B. Thaddeus and N. Shawn : "Feature-Based Image Metamorphosis", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 26, 2, pp. 35-42 (1992)
- [6] 吉良, 野口, 福井, 井沢 : "3次元アニメーションにおける入力手法", NHK 技報, 12, pp. 22-31 (1983)
- [7] T. W. Sederberg and S. R. Parry : "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 20, 4, pp. 18-22 (1986)
- [8] 安居院, 大江, 富沢, 中嶋 : "アニメーションプリミティブの合成による3角関数近似式動画", 電学誌, 63-D, 1, pp. 87-92 (1980)
- [9] 井上, 吉良, 井沢 : "柔軟な歩行モデルの開発とキャラクターアニメーションの制作手法", テレビ学技報, IPD-90-3, pp. 13-18 (1984)
- [10] C. A. Klien and C. H. Huang : "Review of Pseudoinverse Control for Use with Kinematically Redundant Manipulators", IEEE Trans. SMC, 13, 2, pp. 245-250 (1983)
- [11] M. Girard and A. A. Maiejewski : "Computational Modeling for the Computer Animation of Legged Figures", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 19, 3, pp. 263-270 (1985)
- [12] J. Wilhelms : "Using Dynamic Analysis for Realistic Animation of Articulated Bodies", IEEE Comput. Graph. & Appl., 7, 6, pp. 12-27 (1987)
- [13] P. M. Isaacs and M. F. Cohen : "Controlling Dynamic Simulation with Kinematic Constraints, Behavior and Inverse Dynamics", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 21, 4, pp. 215-224 (1987)
- [14] R. Barzel and A. H. Barr : "A Modeling System Based On Dynamic Constraints", Comput. Graph. (SIGGRAPH), 22, 4, pp. 179-188 (1988)

在称为发明创造世纪的 19 世纪后期,即 1894 年爱迪生发明了“电影视镜”以来,就开始了电影的历史。在这之后,又经过了八十七年,在日本国内,计算机图形学技术开始在商业影片中应用。

“可以看见从来没有见到的东西”

“看见了以前看不见的东西”

“看见了想见到的东西”

在与通过镜头,将对象记录在胶片或录像带上的经典方法完全不同的概念之下,诞生了计算机图形学技术。由此,我们的想像力经受了许多的考验,同时无止境的“贪婪欲望”也在递增。

商业电影中所使用的计算机图形学技术,只不过是一种工具(手段)。从这个意义上说,采用计算机图形学技术这件事本身,既是作品的主题,也是作品的制作目的,这与艺术领域中的确定性立足点完全不同。不断演变和进化的计算机图形学是激发人类想像力(想像+创造)的工具。本章就商业影像领域中如何使用计算机图形学的方法进行制作的内容进行介绍。本章中所涉及到的计算机图形学是指软件的造型图像,硬件造型的实时图像及其在 VR(虚拟现实)、游戏中的应用在此不作论述。

10.1 最新的计算机图形学

在商业影像中,对娱乐界,特别是CM中的计算机图形学的应用,现在还没有太多的人注意,但实际上已经开始发挥了很大的作用。随着计算机处理能力的提高,各种应用软件价格的降低,计算机图形学有了显著的发展,可以用来表现从未见过的实物的虚拟图像。下面,列举一些活跃在美国计算机图形学领域第一线的工作人员的体会。

以前所谓的计算机图形学,实际上是制作了像计算机图形学所制作出来的东西(即有计算机制作的风格)。但是在现在,计算机图形学的发展趋势已经到了无法想像作品是怎样在计算机上生成的程度了。

目前,我们还可以同时利用其他的媒体或技术。因为这些方法可以扩展表现的范围。

大家都开始认定计算机图形学是艺术家的工具之一。从电影《星际旅行》的开发以来,计算机图形学就开始流行了。到目前,计算机图形学已经成为一种不可缺少的,具有创造力的工具。制作好的CM,与普通的照片几乎没有区别。其珍贵性却是无法磨灭的。这就可以理解计算机图形学究竟可以有什么样的贡献了。

这些年无论是原创的,还是在市场上卖的所有软件,已经是作品间的差别了,这对于先进的美国当然不用说,在日本国内也是这样的。硬件上,主要是如何巧妙地使用这些工具,怎样生成原创的影像,换句话说,是否有使之成为可能的素材的比重正在加大,所以计算机图形学也渐渐地在原本意义上与其他的影像技术并行发展。即使是使用相同的软件和硬件,在不同显示器上所看到的影像也会有明显的不同,这不是熟练程度的问题,而是表现力的不同,因为所谓的表现力应该是指“细节上是否可以作到非常好”。

10.2 “壁垒”的崩塌

计算机图形学的发展,已经不是单纯的计算机硬件/软件方面所

生成的作品,近些年来数字图像技术带给这个领域的巨大贡献已经不容忽视了。在影像界中,不仅掀起了巨大的波浪,而且还消除了输入、输出媒体间的“屏障”。众所周知,虽然 F(胶片)、T(录像带)、HDTV,以及 D(光盘)不具有可互换性,但是相互之间却可以交换格式。并且,所有的媒体格式均可转换为计算机图形学中的 RGB 数字信号,各个媒体信号在以往所立起的框架内进行处理和捕获是比较困难的,将此界限打破,以计算机图形学为核心,就发展出了新的可视化技术。

然而在通常的计算机图形学影像的制作中,虽然以 CGI(Computer Generated Image,输入数值、文字等信息,其结果则以图形或图像输出的图像生成)和 IP(Image Processing,输入图形或图像,通过相应的处理和加工,输出新的图形和图像的图像处理)为主流,但在外表的华丽性及话题性中,可以感受到 CGI 是比较领先的。然而两者巧妙地混合使用,在表现中也获得了成功,《终结者 2》就是一个典型的例子。在国际上,与影像制作相关的人员之间,对计算机图形学进行重新评价的要求越来越强烈。到目前为止,都是在各自领域中,独自建立起各自的风格媒体。但是在这里,计算机图形学的出现,使之有了非常大的变化。CGI 与 IP 浑然一体之后,提供了一个在各个媒体之间非常容易相互渗透的环境。影像仅在单一的媒体中是很难生存下去的,这是一个不容忽视的现实。

10.3 好莱坞与计算机图形学

商业影像的王者无论从哪个角度讲都是剧场电影。在该领域的“麦加”圣地好莱坞,发起了数字化革命。在《终结者 2》(以下称为“T2”)制作的前后,采用计算机图形学技术以及数字图像处理技术所制作的好莱坞电影已达 40 部之多。目前,好莱坞的相关人员相信,高分辨率计算机图形学及图像处理,总有一天会改变 SFX 的状态。其转折点就是“T2”。该作品中所使用的计算机图形学技术,在多种杂志中都进行了介绍,作为一个作品已经渐渐成为过去。但是古典的 F 与最前沿的计算机图形学,因数字化媒体的介入,说它是一个成功的历史作品也不为过。

在“T2”中的 43 个剪辑片断中都有用计算机图形学方法制作的场景和实际拍摄场景的合成场景,所采用的技术在当时是最先进的。目前,用计算机图形学方法制作的电影中,所具有的“这个是经过处理的”瑕疵印象多少有些无法接受。原始的完成度,精炼的思路,素材的表现这三步的结合,是成功的保障。从事计算机图形学的人类,不知不觉地作为自然体被计算机图形学所接受,由此产生非常大的魅力。

从事“T2”的计算机图形学与图像处理的 ILM(从事 LCARS FILM 的 SFX 的公司名),在“T2”以前的作品中,对预先设计好的实验,在软件、硬件两个方面都进行了大胆的尝试。软件方面尝试了变形方法,所谓的变形(morphing)原意是进行变形(metamorphosis)处理的 IP。该软件原型是 NYIT(纽约工业大学)在 1980 年公布的。在第 9 章中已经介绍了变形的制作方法,而这里所指的变形是将两张不同的图像进行缩放变换,与融化消退不同的是,具有可以指定对应的局部变换的特征。例如用一个男生的脸和一只老虎的脸为素材,如果将眼睛、鼻子、嘴巴、轮廓等分别对应起来,就可以实现男生渐渐变成老虎的变身场景。自从麦克·约翰逊的电视摘录《BLACK & WHITE》放映以后,该项技术也在日本频繁亮相,在许多作品中用来表现作品的变形效果。接下来是运动模糊,即晃动。照相机在被晃动的时候,画面会变得模糊,在照相机前快速移动的物体被拍摄下来的时候也是模糊的,这种现象是追求写实性的电影中不可缺少的要素。开发出被 ILM 使用的 RENDERMAN 的 RIXER 公司,以电影的实用化为前提,很早就将运动模糊效果加在了作品之中。与图像处理的相似性不同,这是一项与物体的移动距离、时间、拍摄物到照相机的距离、快门速度、物体的景深等相关的高技术。其中最难的部分还包括了噪声的处理。众所周知,计算机图形学所生成的画面,是仿佛在无菌工作室中培养出来的非常纯的画质。然而,在通过镜头拍摄的胶片上,因为空气中的尘埃,在胶片上会有一些微小的颗粒存在。不仅仅是照明、色调、对比度等要进行很好的匹配,对尘埃粒子的匹配也是完美合成的一个重要环节。为此,需要根据意图,在计算机图形学方法所生成的图像中要加入一定的噪声。当然,场景改变的话,拍摄条件也不同,所以对应其不同的拍摄条件要分别进行适当的处理。在硬件方面,采用激光胶片扫描仪,将连续的写实胶片一帧一帧地进行扫描

和输入。在数字化后的写实图像中,合成由计算机图形学方法生成的内容,经过处理之后,再以胶片的形式输出。在柯达公司的报告中提出,要按照与原始图像相同分辨率再现图像画面,最低也需要 4000×4000 像素的分辨率。在“T2”中,据说是根据场景的不同采用了三种不同的分辨率。由计算机图形学方法进行数字合成或者是透明物体的合成是比较简单的,可以一边在显示器上进行观察确认,一边进行操作。“T2”是将用多边形制作的敌方终结者的 CGI 与进行变身的处理,用 IP 处理后的三维与二维数据进行混合的计算机图形学方法处理后制作成的。因此,这种混合型的风格成为现在计算机图形学的发展趋势。

10.4 高端(highend)计算机图形学

在表现水平已经提高的当今时代,用计算机图形学进行制作,在各个范畴中所特有的含义的解释已经淡薄了。在数年前,还可以听到“在 CM 中使用了 CG”,“在博览会上使用了 CG”等消息,到了现在,计算机图形学的制作已经在演艺界、娱乐影像中被广泛使用。并且在一般人的日常会话中,也常常提到计算机图形学这个术语。在商业影像领域中,在什么地方,用什么技术,可以表现什么内容应该成为主要的话题。当然,在博览会上使用的大型影像与在电视中所使用的制作环境是完全不同的,这种差异目前的现状还是与原来的影像相同,仅仅是日程、预算与输出媒体上的差异。因此,在这里,我们将以计算机图形学的表现方面为中心进行讨论。这是计算机图形学技术发展中的一种形态。

★ 1. 合成影像

目前的电视,以及光学合成中,单单是获得背景与前景的关系,将原始景物中的前景与背景之间所存在的物体空间或者距离进行设定,较远的物体设为较小,眼前的物体则比较大,根据这种远近法只是获得面积比的处理。但是,例如在用计算机图形学的方法制作的舞台上合成人物时,如果将数字化后的人物匹配在一个透明的背景模板,素材则要求是二维平面上所在的地点,在三维空间上也存在相应的坐

标,人物周围也要求存在非常明确的物理空间。这样,就将无法使用简单的二维合成,或者是虽然可能但是必须经过相当复杂的操作才可以进行合成。如果与运动控制照相机连动的话,则可以获得更具立体感的影像。虽然还没有很多的实例,但这已经是功能最高级的合成影像了。

☆ 2. 变形动画片

这里所谓的变形,不是用 FFD(Free Forme Deformation),NUBS(Non Uniform rational B-Spline)对物体进行缩放、旋拧、弯曲等处理,而是指将物体变成与其形状完全不同的物体(从这个意义上讲,说变身更贴切)。对数值进行处理是计算机图形学最擅长的,现在的计算机图形学动画制作方法中的主流方法是关键帧方法(设定两点以上的关键点,在这两点之间,按照指定的帧数通过插值处理获得中间帧的方法)。然而,无论什么方式的机械插值,都会导致无生命的无表情动画的产生。因为完成度与关键帧的位置以及关键帧的设定数等相关,所以有时也要求动画有识别能力。左右变形影响力的有三维数据也有二维数据。前面所介绍的变形是指后者。对于三维数据,形状数据限定为多边形或包围盒。变形作用的结果,如果不以透视图的形式用录像机录下来的话,就无法确认,所以在 WS 的位图上,作为电信帧或者描影法模型,可视化的建模器或动画工具的出现,提高了制作效率。

☆ 3. 特性动画片

特性,不单单是就指人类或动物的形状,也可以表示原本就不需要表现感情的无生命体。核心是将该物体按照制作意图,在制作动画的时候,对其赋予生命与情感,并变身为演员。特性动画是否成功,受限于表示丰富表情的非现实主义意义下的变形所对应的动画软件的水平。最近,在市场上卖的软件包中有非常优秀的产品,最优秀的产品当然就是看它是否具有动画的识别能力。在计算机图形学技术比较先进的美国,迪斯尼等动画片中都有计算机图形学技术的渗入。并且他们将计算机图形学作为合适的工具来制作动画。例如在作品“阿拉丁”中,有魔法的地毯在空中飞,这个地毯是一张波斯地毯,有着非常复杂的图案。人们把这个图案分别在动画片中的若干帧中以不同的形态来表现地毯的飞行,这些帧画面不是一张一张地画出来,而是

用计算机图形学中的纹理匹配方法来生成的。顺便提一下,地毯的动画不是计算机图形学方法生成的,而是手工画的,从这些画可以获得三维多边形数据。

★ 4. 立体影像

日本最早的立体影像(又称为仿真影像)是用设置在东京后乐园的装置上(圆形的称为 UFO)的 16mm 的电影放映机放映的。之后,在濑户大桥博览会上,多田野馆引进了加拿大的魔法动作系统,这是在日本国内的博览会上首次亮相的。说起来,最早的立体影像专用设备是航空公司用的飞行员训练专用仿真系统,现在,则已经作为娱乐设施来使用了。由一张张胶片表现出动作的录像带、整体驱动的舱室,和驱动设有椅子的地板等,应用在多田野馆、迪斯尼乐园中的星际旅行和藤田大厦(后述)中。其中,由六轴油压动作的舱室可以再现最自然的动作。影像未必就一定是采用计算机图形学,但是不受约束的计算机图形学从微观到宏观可以自由地设定场景,可以说是这类影片制作中比较合适的一种工具。

10.5 作品实例

本章以具体的实例来进行介绍。前面彩图的标号顺序与下面介绍的顺序相对应。

(1) THE NATURE(合成/特性) 这是 1990 年在大阪举行的花卉博览会上制作的 70mm 的作品(参见彩图 10.1(a))。作为主角的蜜蜂,它所具有的许多人类的演技,以及细节上的写实性等方面,是采用了计算机图形学技术实现的。进行了四个月的反复合成实验,得到了全新的合成方法,全部采用的是光学处理。制作的步骤如下:① 先拍摄到背景的真实场景;② 将该背景影像转录到视频帧中,与电视画面帧中的,用计算机图形学制作的画面进行简单的合成,从而确定位置关系与大小;③ 用透视图描述的蜜蜂与拍摄到的真实场景在视频中进行色度合成,对光的方向、对比度、色调等细节进行处理;④ 在原分辨率下求出透视图,进行每帧的重编码;⑤ 虽然进行实验室操作比较简单,但是环形影像作为环绕电影还是世界上最早的合成物,所以

最后需要对试行错误进行反复的修正。此外,场景中对山毛榉生长的仿真是在法国的国立农业研究开发中心(CIRAD)的协助下共同制作的。实质性的制作时间是一年(详细过程参见图 10.1)。

(2) BS 竞技场(合成) “THE NATURE”是在写实画面中用计算机图形学方法所生成的物体面,这个作品中所使用的方法是,在用计算机图形学方法生成的背景中合成真实的人物(参见彩图 10.1(b))。位置关系不是根据肉眼看是否吻合来确立的,而是基于拍摄人物的运动控制摄像机的数据。该系统具有五个轴,这五个轴分别带有一个步进电机。步进电机的旋转次数的实测值,可以对应于视频帧单位的坐标轴与旋转角之间变换,根据这个变换关系来编写程序。

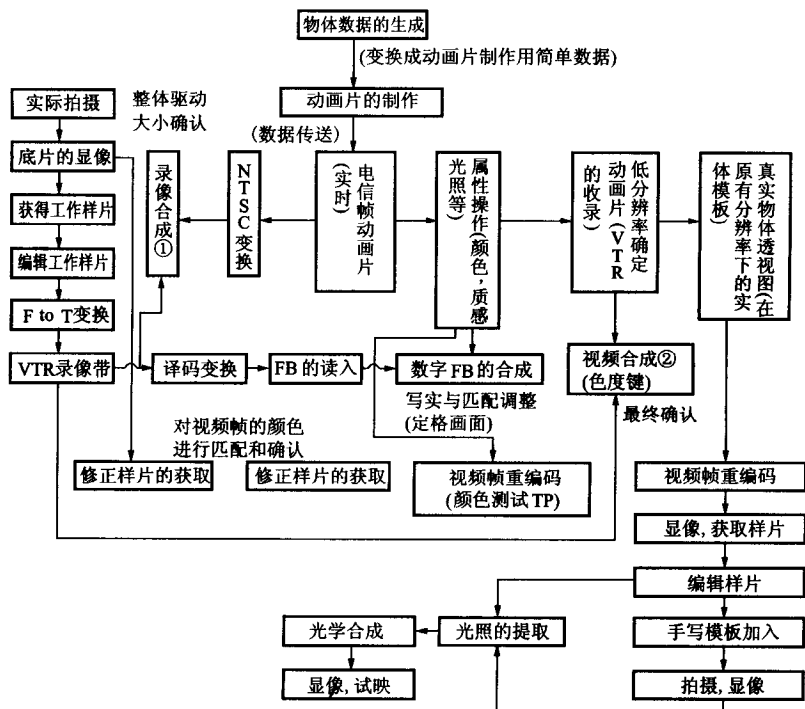


图 10.1 花卉博览会上的“THE NATURE”的制作过程

五轴复合的复杂摄像机工作,凭人的肉眼进行融合几乎是不可能的。人物在用胶片方式拍摄到的视频帧中进行变身,经数字化后,在

透明的模板上进行匹配合成。人物在用计算机图形学方法生成的空间中亮相,与光粒子的前后关系用三维数据进行处理。

(3) 亚莉娜公主 V(合成/变形) 宫泽脱下瓶子做的衣服这一作品,实际上是用计算机图形学的方法制作的,这在当时让许多人感到非常吃惊,也感到不可思议(参见彩图 10.1(c))。这真是一个非常大胆的尝试。这是一个将用计算机图形学方法生成的东西,表现得完全不像计算机图形学方法生成的,没有人工痕迹的成功事例。当然,采用了运动摄像机进行了坐标变换。获取素材中最麻烦的是,宫泽的动作与瓶子的动画在时间上的吻合。只有这一点,用运动摄像机无法分割出来。因此该作品的制作人员,采用了计算机图形学的方法,找出数字化后的实拍关键帧,对其进行中间帧的处理。瓶子自身的变形,则可以用程序来控制,合成中采用了玻璃¹⁾系统。

(4) Uotian Nanchan 的模仿(合成/变形) 内容就是前面介绍的“T2”的滑稽模仿作品(参见彩图 10.1(d))。在当初的企划中,预定是在剧场公开之后放映,设定的也是“T2”。这部作品的合成全部采用计算机图形学的方法。在画面中,用计算机图形学方法生成的乘坐宇宙飞船的人物移动的场景,对用固定摄像机拍摄到的人物的 VTR 素材进行数字化后,用透明模板进行匹配,移动这个模板,就感觉人物在移动(参照 5.1 节),这样就回避了原本人物侧面可以看见的摄像机工作的问题。变形则采用了计算机图形学中的变形方法。

(5) IMAGINATION(变形) 这是 1989 年在横滨的博览会上使用的制作成 70mm 的作品,是世界上最早的大型彩色立体影像(参见彩图 10.1(e))。眼镜采用人工偏振片的形式表示。因为该作品是为了在会场上安置的大小为 20m×15m 的大型屏幕上放映而进行的立体设计,所以在小的屏幕上放映时,立体感略弱一些。在这个作品上,从 SL 到线性发动机牵引列车,全部用了三维的变形。基底的形状数据在模型中以网状的卷盘形为基础,对其进行三维数据化,并将其转换为输入的多边形。多边形上的变形是将描述眼镜及发动机牵引列车用的多边形数进行匹配为原则的,当多边形的数差别很大的时候,多边形少的那一方需要设定重复的次数。对于简单的线性插值的变

1) 日本主持人内村光良与南原清隆。

形,会产生无生命动画片而无法产生出相应的风格,所以在变形的秒数上专门加入快或迟的时间差来进行改善。

(6) 松下 AV(变形) 虽然是相同的变形,但这个作品完全改变了风格(参见彩图 10.1(f))。商品是在墙壁上组合的 AV 系统,其厚度(实际上在墙壁的内侧应该可以容纳这个系统)是关键点。这个作品表现的是一个为了强调该 AV 系统,用刷子涂上油漆,在肉眼可以看得见的系统中进行变形的内容。因为在匹配上做尝试的方法在变形上有问题,所以该商品是全部采用三维数据制成的。这种表现方法作为图像是可以想像的,但是不实际做一下的话,是无法判断能否实现的,这样就需要冒很大的风险。油漆涂过的不均匀凹凸效果用碰撞匹配来处理。其结果不一定说得上漂亮,相当程度地依赖于人在制作时所使用的技巧。

(7) 豆制品(变形) 达芬奇笔下的蒙娜丽莎实际上是非常爱吃甜东西的人,结果……。单单脸变得比较胖,用 IP 技术就可以进行了,但是要表现她朝着照相机,并且使眼色表示某个含义(参见彩图 10.1(g))的效果,则不得不需要对三维数据进行处理。该作品中,头发除外的脸部的数据,用多边形生成,之后将其与蒙娜丽莎的脸进行匹配。因为两个边界需要进行一些扩展,所以严格地说与原始的数据是有一定差异的,此外,原画的横纵比例,不符合电视的显示比例,所以在素材中也加入了一些小改动。

(8) 花牌(合成/变形) 这是用计算机图形学方法生成的画面,还是电视画面,或者是 SFX? 这是一个在放映后产生疑问的作品(参见彩图 10.1(h))。如果单单将使用小麦粉制作的菜肴的美进行拍摄,则没有震撼的效果。因此,这是一个将平常不会引起注意的,经常吃的菜肴(如油炸食品,点心,蛋糕,面条)等实际上是用小麦粉作的东西大胆地使用视觉效果来进行渲染的作品。作品中,将三维数据和二维数据进行了混合。油炸食品粗略的视频效果用包围球来生成,之后将其与实际的素材进行匹配。油中下落的气泡是用粒子系统生成的,由程序控制,点心和蛋糕则使用变形技术的图像处理来实现。面条也是由一部分数据来生成的,在同一时刻拍摄到的面粉与实物的面条,采用渐渐淡化的效果,将两者合成在一起。

(9) YONSANMAN(合成/特性) 将二维的原图像用计算机图

形学的方法再现是非常困难的。况且,这是一个不得不用计算机图形学技术来生成的作品。YONSANMAN 是一个惟妙惟肖的演员,作品中将实况转播中所拍摄到的舞蹈演员的胶片进行写实投影(rotoscope)¹⁾(参见彩图 10.1(i))。在白色的衬衫上画上栅格,从正面和侧面进行拍摄。特写的表情需要在以若干帧为单位的关键帧中间进行插值,要求具有动画的辨别能力。合成后的视频,为了进行匹配确认,将全部的实拍录像全部数字化后在计算机上进行虚拟合成。

(10) “金属鸟”(合成/特性) 先驱者的 LD 吉祥物是一只绿色的鹦鹉,为了对其进行“性感机器人”化的渲染,空山基用一只金属鸟对这只绿色的鹦鹉进行了改造(参见彩图 10.1(j)),希望这只机器鸟有非常柔和的羽毛随着它的动作而动作。他用具有骨骼的树状结构进行组合,各个分支都是可以进行动画动作的,单单 XYZ 的伸缩,FFD,就需要人在其中进行一定的参与变换。空山给出了对计算机图形学的理解,“纸上画的东西与立体的物体有区别,所以要在合适的地方,巧妙地使用计算机图形学技术”,所以他可以非常自由地进行编辑。对身体进行静态拍摄的摄影棚中的组合,进行扫描输入,之后对环境进行匹配,合成电视录像。

(11) “IGT”(合成/立体感) 在 JR 线上的代代木车站附近,有座藤田大厦,大厦的二楼,设置着区域开放型的娱乐设施,这是一个设置在其中的光学系统专用的影像(参见彩图 10.1(k))。在藤田大厦中,将仿真机械放在了未来型产品工具的地方,景观仿真是使这种机器体验的最顶尖的目的。第一个原因是,所谓的“制作有趣的软件”的需要。整体放映是 4 分 30 秒的内容,在最高的屏幕上微型飞机以及除人类以外的物体,都是用计算机图形学技术制作的,例如在后半段中出现的喷出火焰的石像,素材是在黑箱中拍摄的胶片素材,用 HD 电视电影的形式,转录到录像带上,用计算机图形学的方法,先将其数

1) rotoscope 是将用胶片拍摄方式所获得的场景进行写实投影。每一帧的轮廓,形态在纸上临摹绘制出来的方法。迪斯尼中的长篇动画片《白雪公主》的写实动作,就是采用这种方法制作的。此外还采用的光学合成用的模板,在工作站的监视器上将实拍的场景与计算机图形学所生成的场景进行融合,例如将所生成的动物或者是人物进行融合,而制作出动画片的话,可以追求高的写实性。

字化,来进行匹配处理。水中的恐龙是用包围球模型生成的,用碰撞匹配方法进行凹凸处理,虽然只是一瞬间的场面,但还是实现了眨眼等细微的动作,用程序控制鱼群在前面的游动。在最后亮相的水中市,用光线跟踪方法进行造型处理,建筑物之间的相互反射,道路等地方产生的阴影等,都非常逼真地表现出来。分辨率很高,一帧的透视图需要一个小时才能生成。在骑马的影像片段中,可以在正面窗口中选择屏幕,通常,在前进的主观影像中是得不到的。因为不能像电影那样可以进行剪辑,往往会想知道“现在发生了什么事情?”。因此,本次是设定两台机器进行移动,采用将前面机器所遇见的内容进行可视化处理的方法。这种类型(风格)获得了非常好的效果。

计算机图形学是“表现”与“技术”的表里关系的可视化工具。但是,“表现什么比较有趣?”与“使用什么样的技术?”原本不是相同意义的,影像制作中不可缺少的两个主题是,作品的主题与表现的主题。要制作什么?可以如何实现?计算机图形学是后者具体实现的可选择的方法。不了解计算机图形学的人的思维与设想有时非常有趣,这是为什么?总之,计算机图形学的术语大概到了摆脱其狭义定义的时候了。

从 1963 年研制出绘图板开始,计算机图形学技术发展到现在,已经有了非常显著的进步。目前已经到了不仅仅是采用文字方式传递信息,更多是采用图形、图像方式来进行信息传递的时代。随着半导体存储器件,以及相关硬件的飞速发展,计算机图形学技术也取得了惊人的发展。从当初只能用线条画来表示的画面,发展到了追求更加具有真实感的各种算法的研究和开发。图像的彩色化方面,也从黑白信息表示图像发展到了 16 色、256 色、1600 万色描述的更加逼真图像的地步。计算机图形学仅使用通用的信息处理装置,还不能完全达到处理时所需要的各项要求,因而还需要图形、图像处理的专用硬件。本章首先介绍计算机图形学中通常使用的输入输出设备,之后介绍为实现处理快速化的专用图形板卡,并且对实现三维 CAD,CG 领域的主流图形处理的图形工作站(以下简称为 GWS)的具体系统,以实例的形式进行说明。

11.1 计算机图形学的输入输出设备

目前,有许多的处理图形,图像的专用设备被开发出来,这类设备处在人与计算机之间交互的人机界面的位置上。这里,就处理二维信息的平面型界面设备,以及处理三维信息的空间型界面设备进行分类介绍。

★ 1. 平面型界面

以往在计算机辅助设计(CAD),计算机图形学(CG)系统中被利用化的多数设备都是属于这一类平面型界面设备。输入设备分为将图像转换为光栅数据进行输入的图像输入设备,以及将二维图形转换成向量形式进行输入的图形输入设备。从计算机输出图形、图像的设备中,具有代表性的有绘图仪、硬拷贝设备、显示器等。

(1) 图像输入设备 图像输入装置可以大致分为两种,一种是使用电视摄像机,通过照相机镜头,将图像数据输入到计算机中的装置。对可用照相机拍摄的场景,具有可以输入立体对象物数据的特点。但是因为精度依赖于照明等拍摄环境,所以需要进行阴影补偿校正等,对图像的灰度分布进行校正。

另一种类型是称为图像扫描仪的,可对照片等二维对象进行输入的设备,是现在最普及的图像输入设备。这种设备可以对照片、印刷品等原稿进行扫描读取,将图像分解成像素,将像素信息输入到计算机中。读取方式使用 CCD 图像传感器的比较多,扫描仪的分辨率一般可以做到从 20DPI(Dot Per Inch),到高精度的 1000DPI 以上。现在所处理的图像绝大部分是彩色图像,所以彩色扫描仪已经成为主流装置。

(2) 图形输入设备 具有代表性的设备是数据转换器、书写板以及鼠标。数据转换器与书写板在制作原理上是相同的,都是采用铁笔或者光笔,获得图形坐标的点指示设备,可以读取图形坐标的绝对坐标值。一般比较大型的设备称为数据转换器,小型的设备称为书写板。坐标检测方式有电磁诱导方式、静电结合方式等。静电结合方式具有消耗电力少的优点,但是有精度比较差,静电信息较弱等缺点。而一般的电磁诱导方式设备的分辨率都可达到 0.02mm,读取精度在 0.2mm。

鼠标也是二维坐标的输入设备,可以读取相对坐标值。鼠标的类型又分为,在鼠标的内侧装有直径为 2cm 的球,鼠标在平板上移动时,通过球的旋转获得坐标值的机械方式,以及在鼠标内侧装有光传感器,在称为衬板的光反射板上移动时,检测坐标值的光学方式两种。

不同公司的这些制品在功能上没有太大的差别,只是在品种上存

在各种方式。例如有与写字板相连的铁笔,也有操作性很强的无绳化的光笔。为了读取坐标,铁笔或者光笔内藏的线圈产生磁场,在书写板的一侧检测出来,为了传输线圈的电流,通常线圈与书写板相连接。但也可以将其如同无绳电话一样,将铁笔或光笔独立使用,使操作性加强。此外,数据转换器,书写板与液晶显示器一体化的,称为**液晶书写板**的制品也已经实用化了(参见图 11.1)。

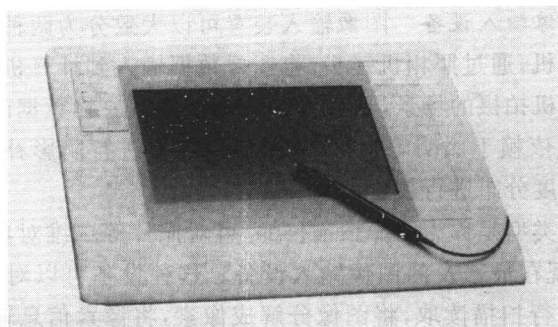


图 11.1 液晶书写板(资料提供:精工电子工业公司)

液晶书写板不是一个输入设备,而是作为笔型计算机的输入输出设备被采用。今后,这些设备将不仅仅是作为 CG 的设备,在计算机的图形用户界面(GUI:Graphical User Interface)上,也将占有非常重要的位置。

(3) 输出设备 将计算机内的信息以图形、图像这种可视化的形式输出的设备分为可输出到纸、胶片上的硬拷贝设备和在 CRT 等设备上显示的软拷贝设备^[1]。硬拷贝装置中具有代表性的有绘图仪、彩色打印机等,软拷贝装置中具有代表性的有图形显示器等。

(4) 硬拷贝设备 随着计算机图形学的飞速发展,彩色高品质图像的输出成为迫切且频繁的需要。由此,多种硬拷贝设备被开发出来。主要的硬拷贝方式包括静电方式、激光方式、溶解型或升华型的热转印方式、喷墨方式、显像方式等。

静电方式是在绘图仪上很早就已经实用化的方式。可以在最大为 A0 大小的纸张上进行印刷,不仅可以对 CG 图像进行打印,而且在 CAD 图的输出打印中经常使用。

激光方式是由激光在感光鼓上产生电荷,附着墨粉之后,再转印

到纸张上的方式。目前,可以在最大为 A3 大小的纸张上打印,并且具有可使用普通纸的优点。

热转印方式是通过加热头加热后在纸张上印刷的方法。升华型可以对微细的中间灰度级进行控制,因此采用这种方式的设备,可以得到近似照片的图像。

喷墨方式是通过喷头将墨水微粒喷射到纸张上的方式来进行打印的方法。

显像方法中具有代表性的是胶片帧记录仪。因为它采用的是在照相机中所使用的感光胶片作为记录媒体,所以可记录 CRT 图像。与上面的硬拷贝设备相比,这种方法的颜色再现性很好,又因为设备比较便宜,所以在计算机图形学和图像处理领域中的使用非常普及。

(5) **显示器** 显示器是指将计算机内部的图像、图形在阴极射线管(CRT)上实时显示的设备,为了在 CRT 上绘制图形,电子束移动的方式分为**随机扫描(矢量扫描)方式**和**光栅扫描方式**两种^[2]。在采用随机扫描方式的显示器上,电子束随着给定的坐标值的顺序移动(参见图 11.2(a))。在另一种广泛使用的光栅扫描方式的显示器上,电子束则是在扫描线上移动的方式(参见图 11.2(b)),从表示分辨率来分,既有从个人计算机所使用的 600×400 像素的显示器,又有 2000×2000 像素的高分辨率显示器。

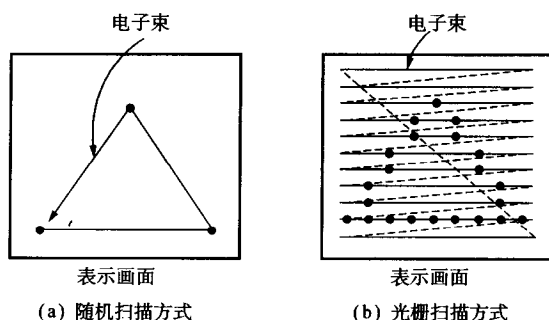


图 11.2 电子束的移动

随机扫描型显示器具有表示线条美观,可显示动画等特点,但是当表示的图形比较复杂的时候,就会出现弹动的现象。并且彩色化比较困难,所以近几年已经不太看得到了。光栅扫描型显示器可以表示彩色信

息,可显示动画,价格也便宜,所以在多数设备上都是采用这种类型的显示器。但是,因为这种显示器在显示斜线时,会出现很多明显的毛刺,所以,一般都要进行所谓的抗混叠(antialiasing)处理来消除线段的毛刺。现在,CRT 虽然仍旧占主导地位,但是液晶(LED)面板等平面面板显示器已经在个人计算机上使用了,今后这类设备将会普及更快。

此外,作为图像的存储设备,动画的记录设备 VTR、处理大量的图像数据的 CD-ROM(播放专用)、光盘(MO)(可读写)等设备的性能也在不断提高。

★ 2. 空间型界面

前面所介绍的界面主要是处理二维数据的设备,因为在三维计算机图形学领域中处理的信息是三维数据,所以输入、输出也是需要是可以进行三维数据处理的要求是非常自然的。因此,在近期,与虚拟现实(VR)相关的技术正朝着实用化的方向飞速发展^[3,4]。其输入、输出的核心是操作三维信息的空间型界面。即使最一般的商用设备,也需要可以对空间上的坐标、方向进行输入的 3SPACE。如图 11.3 所示,需要配备可以检测出手指弯曲信息的数据手套,以及用液晶制作的对左右眼独立显示图像的实现立体视觉的 Eye Phone 设备。

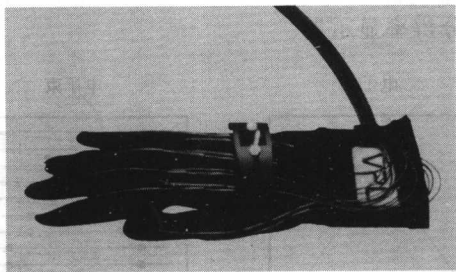


图 11.3 数据手套

POLHEMUS 公司研发的 3SPACE,采用交流磁场,可以对在空间内存在的传感器的位置、倾斜角度进行测量,故称之为三维数据转换器。如图 11.4 所示,由源端产生磁场,在这个磁场中放置传感器后,在传感器上产生电流。测定这个电流的大小,就可以得到传感器的位置、姿态信息^[5]。测定范围是从源端起大约 30cm 的范围内,距离精度为 0.25 英寸,角度为 0.85 度。数据手套如图 11.3 所示,根据从

手套上获取的光纤电缆的弯曲度,可以测得手指的弯曲度。通常,光纤是用来作为光的传输通道的,但是这里所使用的光纤则是经过了特殊的加工,使向外漏的光对应于弯曲的角度,测定通过这个光纤到达的光量,就可以得到手指第一关节与第二关节之间的角度。此外,从耐久性以及价格方面考虑,目前在市场上已经可以看到用导电墨水或者是变形标尺替代光纤检测弯曲和变形等的设备。

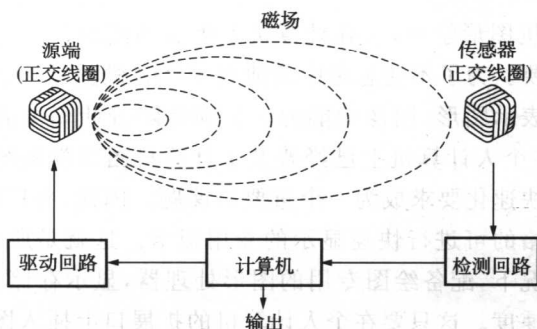


图 11.4 磁性传感器的原理(资料提供:日商电子)

与立体表示相关的方法中,已经实用化的方法包括完全覆盖视野的,存在左右眼视差的独立图像的表示方法,以及在计算机的管面上用时间上的分割来表示左右图像,利用偏光或是液晶片使左右眼交互看见的方法。无论哪种方法,都是利用两眼间的视差来产生立体视觉的。前者的一个实例是 VPL 公司开发的 Eye Phone。图 11.5 所示是使用两片 3 英寸的彩色液晶,分别为左眼观看专用和右眼观看专用的帽式显示器。在左右两侧的液晶上,显示具有视差的图像,就可以给出具有立体感的视觉效果。这种方法的缺点是,受液晶的像素点数的限制,很难实现满意的分辨率。因为这个设备上装有两片彩色液晶,所以长时间佩戴的话,也会感觉比较重。而后一种方式,使用 60~120Hz 的影像



图 11.5 虚拟现实设备(资料提供:日商电子)

信号,将在 CRT 上交互表示的左右图像在左右眼上分开显示,所以佩戴的眼镜比较轻,但是因为可以表示的图像的大小受限于屏幕的大小,所以不适合在虚拟现实中使用。

11.2 图形板卡

在计算机图形学中,将在计算机上生成的图形、图像快速地表出来非常重要。为了不使思考中断地利用计算机图形学系统,希望系统具有快速表示图形、图像的能力。特别是随着计算机的低价格化,高性能化,在个人计算机上已经普及了计算机图形学系统的实现,这就使表示的快速化要求成为一个重要的课题。因此,各厂商就提供了相应的低价格的可进行快速显示的专用板卡。这就是所谓的图形板卡。一般情况下,配备绘图专用的图形处理器,显示存储器可以提高显示图像的速度。这只要在个人计算机的扩展口上插入图形板卡,就可以实现快速的二维图像的缩放、摇摄等功能。

这种板卡通常包括采用作为处理器的,具有像素点绘制的图形功能的专用 IC,以及存储从应用程序获得绘制数据的显示内存^[6]。由此,对于缩放、摇摄、画面的移动等处理都可以在板卡内完成,所以可缩短显示图像的传送时间。选择适当的芯片种类,可以实现 5M 像素/秒的显示直线的处理。

此外,目前已经研制出了快速生成三维图像的板卡,这是在后面将要介绍的,按照 GWS 上的三维图形引擎的设计思想设计的,安装在个人计算机上的专用板卡。由此,对所谓的特征提取,则不仅是对二维图形,对三维向量,三角形,四边形,以及渐变灰度等都可以用硬件快速实现。一款名为 IRISVISION 的板卡,可以在内置 32 位 CPU 的个人计算机的 AT 总线上,或者是 Migro Channel 的插口上连接使用。这个板卡上由一个可进行 20MFLOPS 的三维图形处理的几何图形引擎和六个定制的芯片构成,具有每秒处理大约 90 000 个三维向量,或处理 9 000 个四边形,或对约 5 000 个多边形进行灰度描述的显示能力,与 GWS 的下位内存的性能相比毫不逊色。应用软件因为可以用在 GWS 中的一个主流产品之一的 SILICON GRAPHICS 公司开发的

GL^[7]的图形库进行开发,所以与现有的 GWS 的兼容性也不错。此外,图形引擎上采用 Transputer,可以达到每秒 250 000 次三维向量的处理,以及每秒 50 000 次三维多边形的显示,还设置有 24 位 Z 缓存。

11.3 图形工作站

在三维计算机图形学领域中,追求写实性与实时性的软件及硬件的研究开发都在不断的发展之中。硬件开发重点放在了实时性的实现上,目前在市面上已经可以看到多种图形工作站的问世。

将计算机图形学中的图形处理进行大致的分类,可以分为在第 1 章中介绍的建模处理及造型处理。将造型处理中的一部分功能用硬件来实现的话,可以提高处理速度。由此便产生了追求实时性的图形工作站。通常,具有三维坐标变换,深度表示(在屏幕上,距离越近的图形,亮度越高),三角形,四边形的平面描影,灰度描影,面消隐的处理等,用硬件处理,由双缓存可以实现动态的运动的 8 位~24 位的帧缓存。

一般的图形处理流程,如图 11.6 所示。从应用程序中获得三维物体形状的几何数据,将此几何数据分割成多边形,传送到几何图形引擎中,可以采用两种方式,一种方式是将几何数据以显示列表的结构传送到几何图形引擎中的显示列表方式,另一种是将数据直接传送到几何图形引擎的近似模仿方式。在几何图形引擎中,对多边形的顶点进行坐标变换,根据剪辑,光源,材质等信息,计算顶点的灰度。在

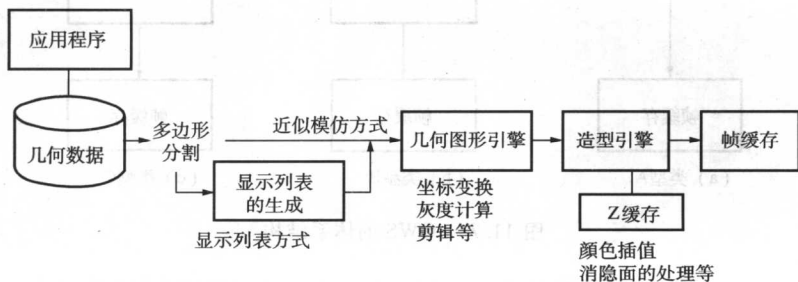


图 11.6 三维图形处理

造型引擎中,根据顶点数据及灰度信息,对各个像素用颜色插值的方法进行计算,由 Z 缓存进行面消隐处理之后,写入帧缓存,显示。

实现这种图形处理的计算机组成结构,如图 11.7 所示,存在三种类型。类型 A 是将所有的处理都由工作站的 CPU 来完成,只具有显示专用的帧缓存。类型 B 是将几何图形引擎与造型引擎硬件化,具有管道型的结构。这种类型在最重视图形性能的高端机种中多用。类型 C 是将造型引擎硬件化,几何图形引擎部分的处理,在 CPU 上以软件的形式实现。

一般情况下,GWS 上所使用的 CPU 是通用的 RISC 芯片,对于配置高性能的 CPU 芯片的 GWS,即使是采用类型 A 的方式进行图形处理,也可以得到实用的显示速度。因为这种方式不需要配置专用硬件,所以系统可以实现低价格。不依赖于专用硬件,就可以实现图形功能是这种机型的特长。但是,对于需要处理大量的,复杂图形的情况,则是无能为力了。例如各种仿真中庞大数据量的实时动态操作的实现需要很高的代价,所以就有必要采用类型 B 或类型 C 的方式。

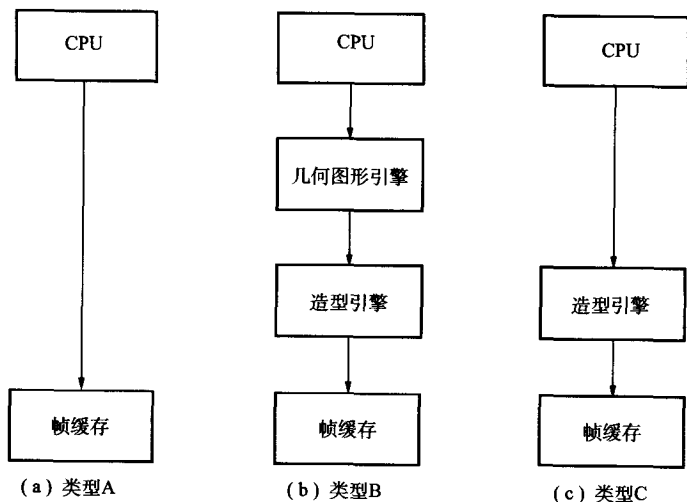


图 11.7 GWS 的体系结构

这里,给出几个具体的 GWS,更加详细地对其体系结构进行说明。

类型 B 的代表产品有 HP 公司生产的 HP900 系列 700 的 Turbo VRX。CPU 是自行开发的,采用了 32 位 RISC 处理器 PARISC,时钟最大为 66MHz,大约具有 77MIPS 的处理能力。如图 11.8 所示,几何图形引擎上并列使用了多个 i860(1~3 个),光栅引擎中采用了定制的 LSI^[8]。由三个 i860 构成的系统具有每秒显示大约 1 300 000 个三维向量,或 330 000 个多边形的能力,这种 GWS 不仅具有一般 GWS 的灰度描影,在 24 位的 Z 缓存中进行面消隐处理,而使用专用的光栅引擎,可以进行纹理匹配,用 α 混合法可以显示半透明效果,以及具有抗混叠的功能。

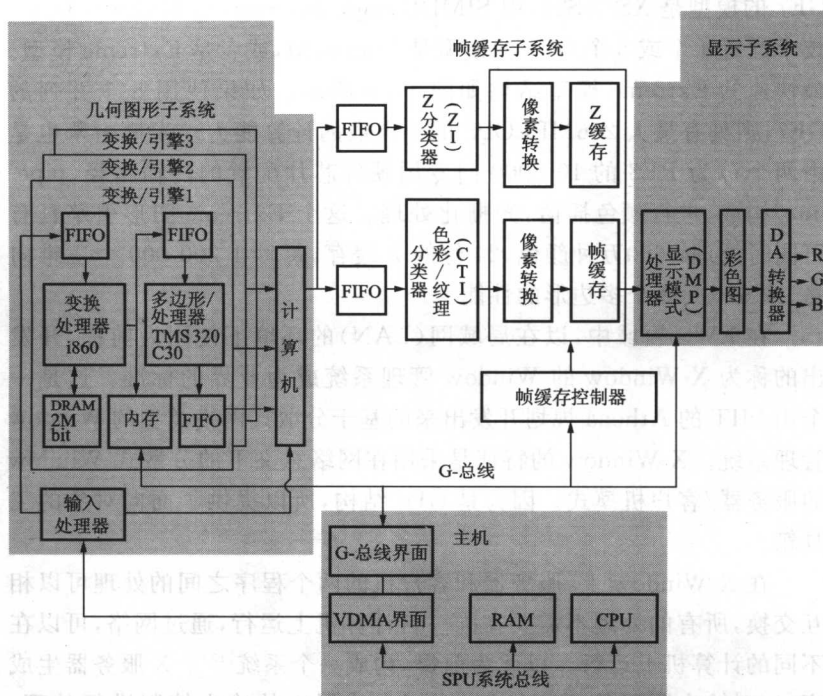


图 11.8 Turbo VRX 的体系结构(资料提供:YHP)

SILICON GRAPHICS 公司的 IRIS Indigo, Indigo2 系列也是 GWS 的具有代表性的产品。这种图形工作站具有功能设定, XS/XS24, Elan 模式, Indigo2 等,最低价格的功能设定模式只有光栅引擎。几何造型引擎功能,则使用了美国 MIPS 公司的 R3000,或者是

R4000 型号的 CPU 的运算处理能力来实现,构成如图 11.7 所示的类型 C 的体系结构。因为用 CPU 来实现几何处理,所以显示速度依赖于 CPU 的运算能力。在 R4000 上,每秒大约可显示 380 000 的三维向量,或 100 000 个多边形。此外,即使是在 8 位平台上,也可以完成像在 24 位平台上表示的数据转换器表示功能,由软件方式处理 Z 缓存可以实现低价格。XS/XS24 模型,Elan 模型,Indigo2 相当于专用的称为 Elan 图形,或者是 Extreme 图形^[9]的硬件来实现几何图形引擎与光栅引擎的类型 B。在这类图形工作站上,一般配置 1~8 个称为 GE7 的可进行 80 000 门运算的 VLSI 几何图形引擎。配置一个 GE7 的模型是 XS/XS24,用 SIMD(Single Instruction Multiple Data)技术配置 4 个或 8 个 GE7 的模型是 Elan 模型,或者是 Extreme 模型。最快速的 Extreme 模型结构如图 11.9 所示。如果使用 8 个并列的 GE7,则具有最大 256MFLOPS 的浮点数的计算能力。光栅引擎也是由两个称为 RE3 的 100 000 门专用硬件芯片配置的传输路径(pipe-line)构成,进行颜色插值,光栅化处理。这个 Extreme 图形引擎具有可同时处理 1 600 万种颜色,24 位的 Z 缓存,每秒 1 200 000 个三维向量,或 630 000 个多边形的性能。

在 EWS 领域中,以在局域网(LAN)的环境下使用为前提,开发出的称为 X-Window 的 Window 管理系统成为业界的标准。这是一个由 MIT 的 Athena 规划开发出来的基于分散式网络类型的 Window 管理系统。X-Window 的特征是采用在网络意义下的分散式 Window 的服务器/客户机模式。因为是 GUI 结构,所以提供了面向对象的工具箱。

在 X-Window 上,服务器和客户机的两个程序之间的处理可以相互交换,所有的处理不需要在同一台计算机上运行,通过网络,可以在不同的计算机上运行。以此为前提,构成一个系统^[10]。X 服务器生成窗口,对输出图形等画面控制,对键盘或鼠标的输入控制进行处理。这样,服务器利用设备驱动程序,可以对窗口资源进行管理。可以将这种 X 服务程序,在专用的硬件上展开利用的设备是 X 终端。客户端对应于应用程序,要求服务器生成窗口,输出图形。客户端与服务端之间的通信,使用 X-window 来进行。

因为 X-Window 只具有二维图形功能,而不具有三维图形功能,

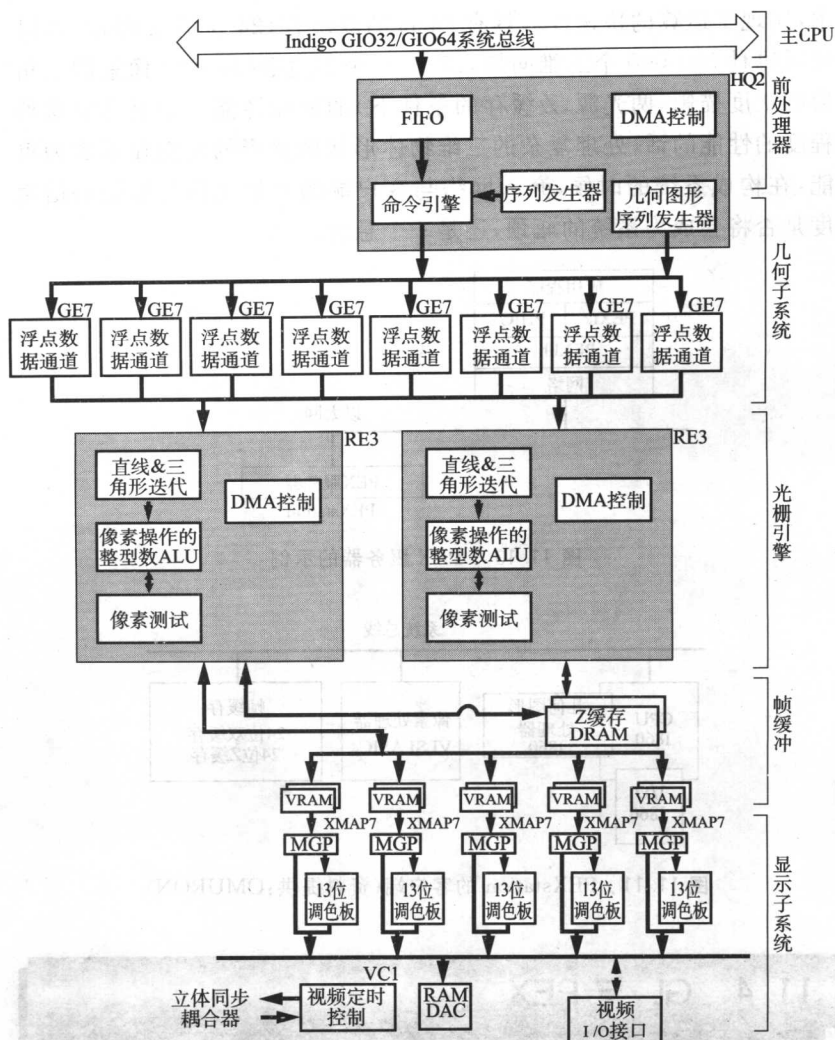


图 11.9 Extreme 图形处理框图(资料提供:日本 SILICON GRAPHICS)

所以可以采用三维扩展的 X11R5 作为服务器,称之为 PEX(PHIGS Extension to X)^[11]。利用这样的环境,就可以构成三维图形服务器。具体的产品是,美国 SHO graphics 公司的 PEXstation。PEXstation 如图 11.10 所示,其内部结构如图 11.11 所示,几何图形引擎采用的是 Inter 公司的 i860。称为像素处理器的造型引擎,则采用 ASIC 技

术,实现了运算的快速性。具有 24 位的双缓存,24 位的 Z 缓存,可以实现每秒 500 000 个三维向量,270 000 个多边形(10×10 像素的三角形的灰度描影,两光源,Z 缓存的条件下)的显示性能。如果具有这种程度的性能的话,处理复杂的三维物体形状的描影的动态显示成为可能,在构成系统的时候,介入网络与客户端的大量几何数据的通信速度是否将会成为系统的瓶颈,还是一个悬念。

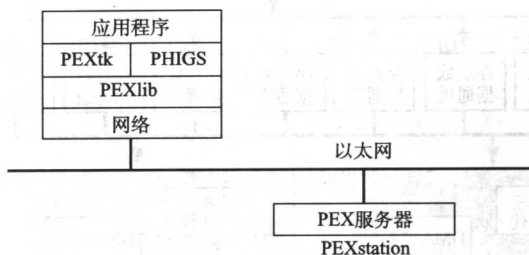


图 11.10 PEX 服务器的示例

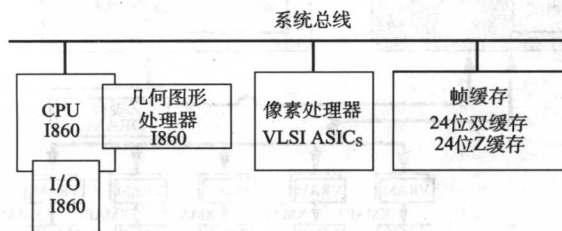


图 11.11 PEXstation 的客户端(资料提供:OMURON)

11.4 GL 与 PEX

现在,各公司的图形工作站都有其非常明显的特征,可以被应用程序利用的具有各种功能的三维图形库函数,许多是按照各自的设计模式来设计的。其中 SILICON GRAPHICS 公司的 GL 函数库与成为国际标准的 PHIGS^[12]是在 X-Window 上使用的 PEX 的两种主流的函数库。虽然 GL 与 PHIGS 都是可以显示三维图形及图像的高水平函数库,但是在显示时,图形数据的描述方法则在概念上存在非常

大的差异。各有其长、短处,所以无法判断谁优谁劣。在 PHIGS 上,设置了称为结构网络的分层型数据结构,将图形数据表示成显示列表,在图形库中进行管理。而在 GL 上,显示列表的管理是在应用程序端进行的,基本上不需要生成一个结构体,直接将图形命令传送到图形处理器进行显示。这种方式就是如图 11.6 所示的近似模仿方式。如 CAD 这类的三维物体形状通过人机对话的方式进行变形,并对其进行表示的应用程序中,采用近似模仿方式,在作为解析结果的静态对象,或者是完成后的形状从各个角度进行评价的应用程序上,PHIGS 的显示列表方式比较方便。此外,从应用程序的可移植性上考虑,成为国际标准的 PHIGS 也是有利的。SILICON GRAPHICS 公司的 GL 已经公布了可以在其他图形工作站上运行的 OPEN GL 版本,PEX 也是 GL 的一大优点,因为可以采用近似模仿方式,所以今后必然是两种方式并存。

11.5 今后的动向

以上,就计算机图形学的硬件方面进行了简单的概述。目前,已经到了不是只有一部分的专家才可以使用计算机图形学的时代了,计算机图形学技术向一般用户的渗透,就使得计算机图形学的输入输出装置的作用越来越重要。输入输出装置的用户界面的构造方法是确定计算机图形学系统优劣的一个重要方面。有效地利用 GUI,将来一定会为不十分熟悉计算机图形学领域的人提供非常容易使用的工具。

可以预想到,在系统的硬件价格越来越低的同时,CPU 性能的提高一定也会有飞速的发展。现在,在所可以提供的最快速的图形引擎上,可以获得每秒显示 900'000 个多边形的速度(50 像素三角形网格,带有纹理匹配,抗混叠,对比度描影)。对如彩图 11.1 所示的高精度实时仿真,也可以获得使用所需的处理速度。此外,在这上运行的计算机图形学系统,不仅仅是原来的灰度描影,纹理匹配,还实现了具有真实感的某种光线跟踪,体绘制等高技术水平的功能也达到了实用的程度。在 CAD 上,对复杂模型进行自由的操作,制作可实时显示的动画片,在虚拟现实中的虚构空间上的流畅的可视化的效果等,会扩展

到需要更加快速的图形处理的领域中。支持这些功能的硬件的实现的同时,从软件的开发资源的有效利用方面,需要进一步地推进使这些功能得到充分的利用的三维图形的标准化。

参 考 文 献

- [1] 花木, 岩下, 寺嶋: パソコン画像処理, pp. 34-35, 昭晃堂 (1992)
- [2] 日本図学会 編: CG ハンドブック, pp. 471-475, 森北出版 (1989)
- [3] 廣瀬 監修: バーチャル・リアリティ応用戦略, オーム社 (1992)
- [4] 館, 廣瀬 監修: バーチャル・テック・ラボ, 工業調査会 (1992)
- [5] 常弘: “VPL リサーチの RB 2”, PIXEL, 115, pp. 98-103 (1992)
- [6] 田島: “手軽に高速化できるグラフィックス・プロセッサ・ボード”, 日経 CG, 58, pp. 15-31 (1991)
- [7] 日本シリコングラフィックス(株) 編: Graphics Library Programming Guide (1991)
- [8] 河合: “i 860 とカスタム LSI の採用で 100 万ベクター/秒を達成した HP Turbo VRX”, 日経 CG, 49, pp. 164-173 (1990)
- [9] Silicon Graphics, Inc.: Indigo Family Technical Report, 2.0, pp.48-70 (1993)
- [10] 小堀: “CAD/CAM 標準化の技術”, CAD & CIM, 23, pp. 89-92 (1991)
- [11] R.J. Rost: “PEX Introduction and Overview”, PEX Ver. 3.20, MIT X Consortium (1988)
- [12] T. Gaskins: “PHIGS Programming Manual”, pp. 1-76 O'Reilly & Associates, Inc. (1991)

第 12 章

计算机图形学的最新动态

在前面我们介绍了三维计算机图形学的算法及其主要的应用。

本章将介绍计算机图形学的最新动向,可视化技术,虚拟现实技术的相关内容,以及三维计算机图形学的发展动向。

12.1 可视化技术

随着计算机的计算能力以及数据的处理能力的提高,使得处理大量的,复杂的数据成为可能,利用计算机图形学的方法,以人们比较容易观察的图形方式来表示数据的需求,在目前也是越来越高。在这里,我们将对其中受用户高度重视的领域,即科学计算,景观仿真,医学诊断领域中的可视化研究的动向进行介绍。

★ 1. 科学计算的可视化

在对物理现象进行分析时,需要求解复杂的方程式。当无法获得方程的解析解时,使用计算机可以根据数值仿真方法对问题进行分析,从而掌握该物理现象本质的方法。近期,在具有非常高计算能力的大型计算机上,可以获得相当大数据量的数值型数据。但是,如果仅仅是将庞大数据量的数值型数据进行排列的话,人们要从中理解所分析出的物理现象中的含义,是非常困难的。因此,就希望通过计算机图形学的方法,以人们非常直观可以理解的形式来描述所获得的结果。通常,完成这个目标需要执行“输入具体的物理形状——离散化——数值仿真——可视化处理”这个过程。例如对原子、分子微观运动的仿真,流体流动特性的可视化,碰撞特性的可视化,灾害的可视

化,空气中力的分析,刚性、噪声、振动的分析,音响放射分析,地球内部结构与地震波传递方式的可视化,气象状况的仿真等。下面,介绍其中的几个具体的实例。

(1) 汽车的设计、分析^[1] 在汽车外观的设计中,采用 CAD/CAM 系统进行汽车形状的设计,采用造型方法生成精细的彩色图像。在需要制作动画的时候,则需要用大型计算机来完成。此外还需要进行以空气动力学特性分析为核心的数值仿真。因为可以将以往根据风洞实验来分析的物理现象,进行仿真并进行可视化实现,所以利用差分方法进行仿真,可以表示出风的流线,等压线。根据对车内空调的仿真,可以表示出车内的温度分布等。

(2) 建筑物的设计、分析^[2] 在高层建筑物的设计中,需要进行对地震时建筑物的三维弹性、塑性进行分析,以此来确认建筑物的安全性。此外,在对周围的气流进行分析及评价的基础上,对周围风害进行估计,并探讨减低风害的对策。建筑物内部的分析也可以利用可视化技术,根据对气流的分析可以用作空调设备的规划。在地震的分析中,通过对地震、岩石层在挖掘时的稳定性的分析,对地面下沉的分析,地震应力的分析等进行数值仿真,可以进行可视化的评价。进一步地,可以在照明、音响设计中应用。也可以用作对礼堂等的照明设计,音乐会礼堂的音响效果分析等进行仿真。

(3) 分子结构的分析^[3] 在分子结构的分析中,化学反应的分析,分子轨道的计算中都会用到可视化技术。特别是对于量子理论中的物理量,因为无法进行直接观察,所以可视化的意义就非常大。例如在大型计算机上对分子轨道进行计算,将计算结果用可视化的形式显示。分子轨道的分析,需要求解波动方程组的特征值与特征向量,这个求解问题可以在计算机上用数值方法求出其近似。分析结果可以用三维的标量场或者是向量场给出,用等值表、密度截面等表示方法或者是流线图来进行表示。

(4) 玻璃瓶伤痕的检测仿真^[4] 可视化方法在制品的检测系统的设计中也非常有用。这里,介绍一种玻璃瓶的设计及玻璃瓶伤痕检测的仿真系统。这个系统是在设计玻璃瓶外观的同时,对伤痕检测子系统的结果进行可视化处理。

在表示玻璃瓶的时候,用光线跟踪法可直接实现^[5]。在瓶子上的

伤痕处,光的反射,以及折射因为具有非常薄的空气层而有所不同,根据对光的反射及折射的计算,就可以得到有无伤痕的不同特征。基于这种设计思想,如果采用光线跟踪方法的话,可以表示出具有伤痕的瓶子。用这种方法,对于任意形状的玻璃制品可以对具有不规则形状,不规则方向的伤痕进行表示,可以在任意的角度对其进行观察。

玻璃瓶伤痕的检测方法之一是,利用激光光线进行伤痕检测的方法。目前正在开发这种检测系统的仿真系统。将激光光线照射在玻璃瓶上的时候,光线所经过的路径,与用光线跟踪法所跟踪的一条路径完全相同的方式进行跟踪。此外,在光线的跟踪过程中,可以求出各分支光线的光线强度。彩图 12.1,就是一个这类系统的示例。当让激光的光线射出时,对处在瓶子伤痕处的光线特性进行适当的分析,设计系统使之可以通过检测器获得伤痕检测的结果。最后确定出这个仿真系统的结果,与对实际瓶子的伤痕仅进行实际测量的结果非常吻合。

(5) 科学的启蒙影像 最近,除了对一般的物理现象进行数值仿真之外,对宇宙中星球的进化过程,黑洞的形成,以及基于相对论的星球损伤情况^[6]等,按照物理法则对其进行的可视化研究非常盛行。此外,在古代木乃伊的复原^[7](参见彩图 12.2),建筑物的复原等工作中也起到了非常重要的作用。与以往的称为科学计算的可视化不太一样,对从前在实际中不存在的,想像中的世界,也可以进行可视化处理,这一方面是计算机图形学中的一个具有魅力的研究领域。

★ 2. 景观的仿真

在建筑物,道路,桥梁等社会的基础建设以及都市规划中,对优美景观的设计要求非常高。特别是大规模建筑群的建设中,更需要考虑到该建筑物群对地域景观的影响是长期的这个因素,所以事先进行充分的评价非常重要。以往的景观设计的方法是采用平面图,透视图等方法,或者是构造三维模型的方法,但是这些方法在其逼真程度上是有缺陷的,并且存在着不容易变更等问题,所以还不能说对其可以实现充分的评价。利用计算机图形学的方法进行的景观仿真,可以应用于实际的大规模开发规划,对其进行合理的评价^[8]。此外,在高速公路的景观设计,电力铁塔的设计中,利用计算机图形学的景观仿

真的应用学术报告也有发表^[9~12]。

景观仿真根据其进行的目的不同,大致可以分为两类,一类是对人造物体的景观评价,例如对独立建筑物美观的评价,大规模都市开发的景观评价等等。这类的应用中,如果有了设计图,就可利用计算机图形学的方法制作出逼真的影像。另一类是,在现有的自然(人造物)的环境中对新的建筑物进行协调而形成景观的情况。这种情况下,需要将周围环境的状态以图像等形式输入到计算机中,之后将用计算机图形学方法生成的建筑物与之进行合成。

(1) 人造物体的景观评价 基于设计数据,用计算机图形学方法,使景观的评价成为可能。在计算机图形学的设计环境中,利用各种技术进行开发。采用建筑物的建模,材质的逼真表现,树木等自然物的表示,照明环境的表现,雾、云的生成等技术,使非常精细的景观评价成为可能^[8]。但是,因为要进行精密的造型还需要非常高的代价,所以只能限定于重要的场景进行这样的精细制作^[9]。

(2) 自然环境中的人造物体的景观评价 在已经存在的周围环境中建筑一个建筑物的时候,需要进行与周围环境相匹配的设计。这时,需要对周围的环境用某种方法,以数据的形式输入到计算机中,在计算机上制作将建筑物自然地设置在环境中的影像。在制作静态图像的时候,输入自然景观的实拍照片,用计算机图形学的方法进行立体图像的合成,采用拍摄蒙太奇镜头的方法^[9]。在生成动画片的时候,因为需要三维物体形状数据,所以对地形数据,道路数据采用人机对话的方式进行输入,或者是采用根据航拍照片获得立体测量的输入方法。在行驶的汽车上放置的摄像机所拍摄的录像的基础上,估计照相机位置的变化,对场景进行简单的三维形状模型的构造,这方面的研究也正在进行之中^[11]。此外,在景观仿真中,加入交通状况仿真,还可以对都市功能进行综合的评价^[10]。

★ 3. 医学中的可视化

利用医学诊断的断层图像检测设备,可以检测到连续的断面的图像。虽然所获得的断层图像中包含着三维信息,但是如果仅仅是将断层图像按照顺序进行排列,则无法理解三维形状等特征。因此,利用计算机进行处理,可以以满足人们容易理解的形式表示的要求。具有

代表性的断层图像检测设备是 X 射线 CT 设备,这种设备是检测 X 射线在人体中各个方向的透射系数,用计算机根据内部断面上的 X 射线吸收系数分布进行逆运算,将人体内部结构实现可视化^[13]。此外,在 MRI(Magnetic Resonance Image),超声波断层图像等也可以作为三维图像的数据进行输入。用计算机对三维图像数据进行处理,可以对三维立体结构进行表示,具体的方法请参考文献[14]。

这些三维信息的表示方法,已经在实际系统中使用,并开始在三维医疗诊断中开始发挥作用。首先在 X 射线 CT 图像的重构计算装置中,装有可显示三维图像软件的设备已经非常普及了,在获得数据时,可以同时同时对数据进行观察,这些技术都已经在临床应用了。表示三维图像的工作站也正在深入的研究、开发以及商业化之中^[15,16]。

技术发展到现在,已经不仅仅是对三维数据进行观察,而是可以对手术进行虚拟仿真了^[17,18](参见彩图 12.3)。利用数值仿真进行功能分析^[19],根据数值控制工作机械进行建模以及人造骨骼的加工^[20],利用三维图像制作机器人辅助手术^[21],表示放射线治疗中的反射线能量分布的表示^[22]等领域,这些更加高精尖领域的应用研究也在发展之中。

12.2 虚拟现实

采用计算机图形学的方法,生成表示现实世界中根本不存在的形状、颜色,以及动作等的的数据,用计算机图形学的方法将这些概念上的内容制作成图像,就使这些内容可以在虚拟现实表现出来。也就是说,计算机图形学是以记录二维图形或三维物体或场景的数据为基础,生成可供人眼观察的图像的技术,是合成从现实世界中所接收到的视觉信息的技术。人类在社会活动中,从身边的环境中获得各种各样的信息,之后通过称为五官的传感器接收这些信息。如果可以将五官从环境中所接收到的信息进行合成,并交给人类,则我们一定会感觉到处在一个被合成的,含有五官信息的虚拟环境中。这种在虚拟现实中进行五官信息合成的技术称为虚拟现实技术(VR:Virtual Reality)。现在,有关 VR 的各种研究正在飞速地发展之中。从计算机图形学开始,到各个相关领域的研究也都受到了关注。

★ 1. 计算机图形学系统与虚拟现实系统

计算机图形学系统在虚拟现实系统中的作用是,对在三维空间上表示的数据在计算机的内部进行存储,将其中虚拟的,人在当前时刻所处的环境中,可看见的场景显示出来。这时,虚拟人的位置,可以通过鼠标或拨号上网的方式传递并在虚拟空间中作出相应的移动,计算出随之变化的场景并进行表示(参见图 12.1)。在虚拟现实系统中,采用可以检测和输入人类动作的设备,将人的动作传送到计算机中,作为虚拟人的动作。这时,对应于虚拟人的动作,不仅以人类可以接收的影像形式,还以语音,立体视觉等感官信息的合成,传送给入(参见图 12.2)。其结果是,人虽在计算机之外,但是却有可能感觉到在计算机内表示的虚拟环境之中。换句话说,可以体验到进入计算机内世界中。

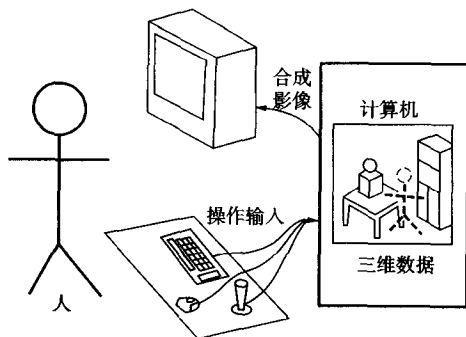


图 12.1 计算机图形学系统

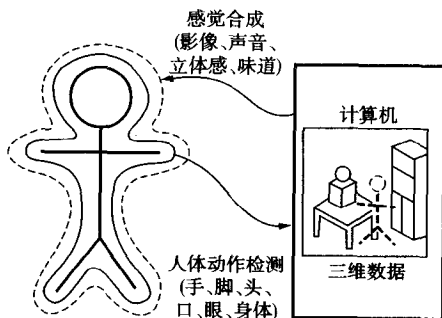


图 12.2 虚拟现实系统

★ 2. 虚拟现实装置的具体实例

若干种具体的虚拟现实系统装置,目前正在研究开发之中。下面,介绍几个相应的实例。

(1) 基于人类动作的虚拟体验装置 虚拟现实系统装置中,具有代表性的装置是,与帽式显示器,以及数据手套连接在计算机上的装置^[23,24](参见图 12.3)。

帽式显示器(HMD):在第 11 章中已经介绍过(参见图 11.5),在头部搭载立体显示的装置,该装置装备有可检测头部运动的传感器,头盔上的护目镜部分配置有两个液晶显示装置,可与计算机连接,实时显示由计算机计算得到的左眼和右眼不同的计算机图形学影像。当实验者有一定的动作,或者

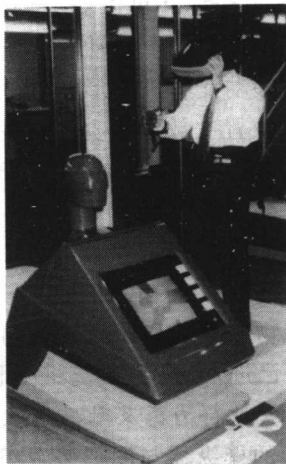


图 12.3 虚拟现实装置(资料提供:英国 W. Industries)

是改变头的转向,三维传感器可测量出其动作的变化状态,并将该变化状态,传送到计算机端。计算机实时地计算出实验者位置改变后的,可以看见的场景,并将所计算出的场景传送给显示装置。实验者在计算机图形学所生成的虚拟空间中观察到这个结果,可以看到自己因为某个动作,或者是头转动后所呈现出的某个场景。也就是说,在由计算机图形学方法所生成的虚拟空间中,可以感觉到仿佛自身就在其中进行对周围环境的观察,可以左顾右盼地看到相应的场景。

数据手套:在第 11 章中,如图 11.3 所示的数据手套,是检测人手指动作的装置,这是一个在装置上装有检测三维空间位置的传感器,以及可以检测手指关节弯曲角度传感器的手套形装置。如果带上这个手套,就可以测出手整体的空间位置以及各个手指的弯曲状态。手套上的传感器所测得的手整体的空间位置以及各个手指的弯曲角度传送到计算机上,用计算机在由计算机图形学方法生成场景的数据中,

合成所测得的手的状态之后进行显示。实验者可以把手移动到计算机图形学方法生成的场景中的某个物体所在的位置上,并将这个虚拟物体抓起来。这时,计算机首先判定物体是否处在手与物体相接触的位置上。之后,还可以变更场景数据,使实验者可以看到手抓着虚拟东西在虚拟空间中移动。其结果是,实验者移动带着手套的手,可以抓住并移动计算机图形学方法所生成的虚拟空间中的虚拟物体。当在某个位置上放开手上所抓的虚拟的东西,则程序开始运行,实验者会看到在场景中,物体从手上滑落到地面上。此外,实验者还有可能看到手投掷虚拟物体飞出去的场景。

综上所述,实验者在通过 HMD 观察到的,用计算机图形学方法所生成的场景中,自由地徘徊,通过数据手套装置可以将虚拟场景中的某个虚拟物体抓在手上,移动到另外一个地方。总之,实验者可以体验到仿佛自己进入到了用计算机图形学方法所生成的虚拟空间之中。

(2) 获得力感及触感的装置 目前,已经开发出了将跟踪人的手及手指的操纵器与图形装置组合在一起,随着手的动作,在用计算机图形学方法生成的画面上,手也会有相应动作的装置。这个装置上的操纵器可以给手一个反作用力,这是该装置的一个显著特征,所以当手接触到计算机图形学方法所生成的虚拟空间中的虚拟物体时,手上会感到有压力,仿佛真的抓到了那个物体^[25]。此外,数据手套装置上各个手指部位,也给出了空气压的触觉感。采用这些装置,在计算机图形学方法生成的画面与手的动作相结合下,使手的触感的仿真体验成为可能。现在,虽然还不能对手的动作,以及反作用力等进行精细控制,但是在不久的将来,这些功能都可以实现,并可以使该装置的性能大大提高。

(3) 飞行仿真 将飞机的驾驶室进行复制,使得操作人员在里面可以感受到飞机的加速度,以及晃动时的各种身体感觉。将这种机械装置与合成从窗外可以看见的外界场景的计算机图形学装置相组合,就可以构成一个可进行飞机操作驾驶模拟体验的装置。目前,这种装置已经非常普及,成为训练飞行员不可缺少的装置。

(4) 立体影像装置 添加在普通的电影(实际图像或计算机图形学方法所生成的图像)中进行组合的,可以给出立体视觉效果的装置,就可以给人提供非常逼真的感觉。例如,从画面上可以看到,与实际

乘坐在车上所看到的画面完全相同。最近,在博览会等活动中,最吸引人^[27]的,不单单是给观众各种具有丰富内容的影像,同时还可以给出立体视觉感的模拟体验这类水平很高的装置。应用在飞行仿真机中的方式包括,整个舱室同时运动的方式和只有座椅运动的方式。

☆ 3. 广义虚拟现实系统

上面所介绍的虚拟现实系统,是输入人工生成的环境数据,实现对虚拟现实的体验。这里,我们考虑从现实环境中检测到三维数据的情况。将人在某个环境中所感受到的影像,声音,冷热,落叶的感触等信息全部进行检测和记录。将所获得的数据输入到计算机中,利用虚拟现实装置,使人会感受到仿佛就处在所检测到的环境中(参见图 12.4)。当然,这里不是进行了记录的操作,只要直接从远方通过通信方式传输过来,进行画面合成,操作者就会感觉到身处远方的那个环境之中,又将此称为远距离现场通信^[28]。

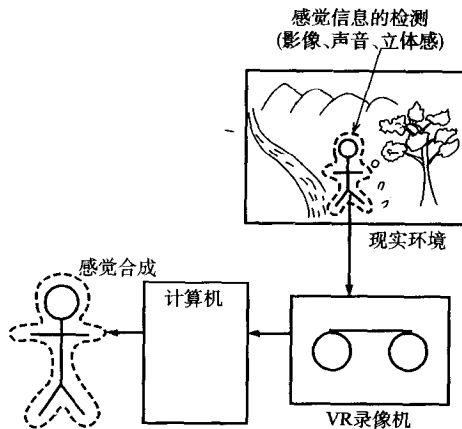


图 12.4 虚拟现实系统(真实环境数据)

另外一项相关的技术是,远距离现场操作,或远距离现场生存(Tele-existence)(参见图 12.5)^[29]。这项技术是,在某个地方有某个人在进行某个动作,将这些情况都检测并记录下来,并将这个动作原封不动地让机器人来完成。这样,当这个机器人所接收到的视觉信息,再原封不动地传输到人所在的一方,这个人就仿佛处在了机器人

所在的环境,也可以接触到所看见的物体。例如,机器人在原子反应堆设施中的作业,或者小机器人在人体内进行相关作业等有可以应用这种技术。

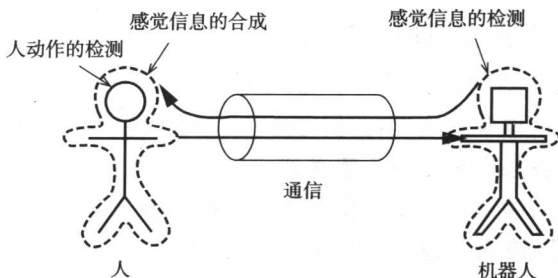


图 12.5 远距离现场操作

12.3 三维计算机图形学的将来

上面,我们对三维计算机图形学技术以及其主要的进行了论述。计算机在将来,随着科技的发展会越来越便宜,性能也会越来越高,并且,计算机图形学方法生成的图像、影像的输入输出设备也会不断地充实。所以可以预见,计算机图形学的重要性将会越来越高。

最后,我们对三维计算机图形学的将来,也就是 21 世纪的计算机图形学与电视的关系进行一下设想。

目前,电视制作现场的最大问题之一是,有能力的专家型人才不足。特别是随着 CATV、卫星电视等媒体多样化的发展,这种倾向越来越明显。

解决方法之一就是计算机上的信息处理系统的应用。而在信息处理系统中,计算机图形学又是一个非常重要基本技术。

(1) 计算机图形学播音员的亮相 采用计算机图形学的方法生成某个人物形象,就可以实现计算机图形学播音员。不需要具备非常艰难的演技的播音员,也很容易将过去非常有名播音员的演技数字化,采用计算机图形学的方法可以比较简单地合成一个播音员,这在不久

的将来就可以实现了。采用计算机图形学播音员,可以解决地方电视台,CATV 电视台中人才不足的问题。特别是象 CNN 这类将从海外传来的消息,翻译成日语之后播出的播音员,该项技术是必不可少的。

(2) 计算机图形学人物的亮相 计算机图形学人物的最高点是计算机演员或者是著名人物的亮相。除了将过去有名的男女演员通过计算机图形学的方法使之在舞台屏幕上再次亮相之外,甚至有可能创造出新的英雄人物。

(3) 特技拍摄场景的制作 在电影中使用的特技场景很多,可以考虑对这些特技场景用计算机图形学的方法来实现。采用高清晰电视的合成技术,对某个危险场景,用计算机图形学方法进行生成,采用特技方法制作出来,可以降低拍摄成本,如彩图 12.4 所示,是影片“完整的回忆”中的一个场面,用计算机图形学的方法生成骸骨的动画,在实拍图像中进行合成而制作成的。此外,在影片《侏罗纪公园》中,可以说已经达到了很难区分用计算机图形学方法生成的图像与实际拍摄的图像的地步。今后,在特技场景中,计算机图形学方法的作用将越来越重要。

(4) 动画片,主题,CF 的作品 在电视台所播放的主题的制作全部都是采用计算机图形学的方法来完成的。此外,动画片,CF 的大部分内容也是由计算机图形学的方法来制作的,由此可以削减制作成本。特别是对于预算比较少的地方电视台,或者是 CATV 电视台,将带来非常大的好处。

除此之外,采用计算机图形学方法制作的场面,可以削减制作费用,缩短制作周期,更进一步,可以解决人才不足的问题。

(5) 高清晰电视与计算机图形学 随着高清晰电视的普及,在清晰度更高的高清晰度电视中还会用到计算机图形学技术来完成相关内容的制作,不仅是在电视领域,在印刷,出版等方面,计算机图形学技术的应用也将越来越广泛。因此,在未来的世纪中,梦想中的立体电视就将亮相。当然,这里也少不了采用三维计算机图形学的技术。

参 考 文 献

- [1] 吉行 隆：“自動車開発におけるビジュアルイゼーションの活用”，PIXEL, 116, pp. 38-43 (1992)
- [2] 川井, 表：“建設におけるサイエンティフィックビジュアルイゼーション”, NICOGRAPH '90 論, pp. 343-351 (1990)
- [3] 伊奈, 柏木, 秦野：“量子論的世界を映像化する対話型分子構造解析グラフィックシステム”, NICOGRAPH'90 論, pp. 197-206 (1990)
- [4] 堀内, 横井, 鳥脇：“光線追跡法のガラスびん傷検査への応用”, 情処研報, 20-GCAD-5 (1986)
- [5] 安田, 横井, 鳥脇：“透明物体表示のための改良光線法”, 情処学論, 25, 6, pp. 953-959 (1984)
- [6] 大口, 上田：“恒星の一生のシミュレーション—主系列星からブラックホールまで—”, NICOGRAPH'91 論, pp. 365-374 (1991)
- [7] 横井, 大下, 安田, 鳥脇：“古代エジプトミイラの 3 次元画像化と解析”, NICOGRAPH'89 論, pp. 309-316 (1989)
- [8] 笹田剛史：“ビジュアルプレゼンテーションと環境設計”, システム/制御/情報, 36, 1, pp. 8-13 (1992)
- [9] 中前栄八郎：“景観シミュレーション”, 情処研報, 39-GCAD-1 (1989)
- [10] 森, 堤, 浜嶋, 太田：“高速道路の景観設計におけるアニメーションの利用”, NICOGRAPH'90 論, pp. 319-328 (1990)
- [11] 石淵, 高島, 平野, 曾山, 志沢, 井上：“動画像処理技術を用いた景観シミュレーション”, NICOGRAPH'90 論, pp. 329-334 (1990)
- [12] 浜嶋勉一郎：“都市の情景シミュレーションに関する考察”, NICOGRAPH'89 論, pp. 273-282 (1989)
- [13] 山岸, 荒館, 平尾：“X 線コンピュータ断層法 (XCT)”, ME 誌, 3, 2, pp. 6-12 (1989)
- [14] 横井茂樹：“医用 3 次元画像の表示技法”, ME 誌, 3, 6, pp. 11-17 (1989)
- [15] CEMAX INC., CEMAX Multidimensional Imaging Systems.
- [16] KONTRON INSTRUMENTS MIP MR 高速画像処理装置.
- [17] 安田, 橋本, 横井, 鳥脇：“CT 画像を用いた形成手術計画支援システム”, 電学論 (D), J70-D, 1, pp. 2134-2140 (1987)
- [18] 曾山, 安田, 横井, 鳥脇：“三次元画像を利用した股関節手術計画支援システム”, ME 誌, 3, 6, pp. 10-18 (1989)
- [19] G.M. Luo, S.C. Cowin and A.M. Sadegh：“A boundary element method investigation of different frictional boundary conditions on bone ingrowth”, Computers in Biomedicine, K.D.Held (ed.), Computational Mechanics Pub., pp. 207-

- 218 (1991)
- [20] 久野, 横井, 鳥脇, 安場: “CT 画像データを利用した骨形状加工の試み”, 信学技報, IE87-117 (1988)
 - [21] Y.S. Kwoh, J.Hou, E.A. Jonckheere and S.Hayati: “A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery”, IEEE Trans. Biomedical Engineering, BME-35, 2, pp. 153-160 (1987)
 - [22] 芦野靖夫: “放射線治療への応用”, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 7, 1, pp. 22-28 (1989)
 - [23] J.D. フォーレイ: 近未来のインターフェイス, サイエンス (1987)
 - [24] W.Industries: VIRTUALITY.
 - [25] 岩田洋夫: “実時間グラフィックスと力感覚帰還装置を用いた仮想立体のハンドリング”, 第5回 NICOGRAPH 論文コンテスト論, pp. 62-66 (1989)
 - [26] 麻生和男: “フライトシミュレータ, パイロットの技量向上に大きく貢献”, 日本の科学と技術, 28, 248, pp. 23-29 (1986)
 - [27] サンバ哲郎: “展示用特殊映像の種類と歴史(6)総括・日本の展博映像 1989”, PIXEL, 88, pp. 142-153 (1990)
 - [28] 岸野文郎: “臨場感通信”, 3D 映像, 4, 2 pp. 3-12 (1990)
 - [29] 館 暉: “「存在」を伝送するシステム 遠隔存在感と人工現実”, 科学朝日, 51, 8, pp. 13-16 (1990)

主编、执笔者简历

主 编



中嶋正之

1969年,毕业于东京工业大学电气工程专业。1975年获东京工业大学博士学位,同年,任东京工业大学信息工程研究中心助教。1983年,任副教授。1992年任工学部电气、电子工程学科教授。从事计算机图形学、图像处理方面的研究。

执笔者



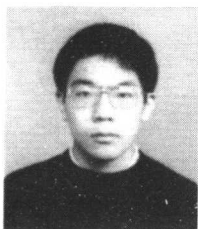
近藤邦雄

1978年,毕业于名古屋工业大学第二部机械工程专业,曾在名古屋大学教务部图形学教研室,东京工艺大学任职,1989年,任埼玉大学工学部信息工程学科副教授,从事交互式计算机图形学、用户界面、知识与情感的语音分析,以及图像处理系统应用方面的研究。工学博士。



大野义夫

1970年,获庆应义塾大学研究生院工学硕士学位,同年,在庆应义塾大学信息科学研究所担任助教。1987年任副教授。1989年,任庆应义塾大学工学部计算机科学专业副教授,1995年,任教授。从事计算机图形学,DTP等相关算法的研究。工学博士。



中丸幸治

1992年,获庆应义塾大学硕士学位,同年,任职于日立制作所日立研究所(株),现在庆应义塾大学研究生院进修,从事计算机图形学方面的研究。



周藤安造

1973年,获庆应义塾大学工学硕士学位。之后,在东芝医用设备事业部工作,从事医学图像的三维成像系统的开发。1991年4月起,任东海大学工学部信息通信学科教授。工学博士。



横井茂树

1977年,获名古屋大学研究生院博士学位。同年,任名古屋大学工学部信息工程学科助教。1978年,任三重大学工学部电子工程学科副教授。1982年,任名古屋大学信息工程学科副教授。1993年任教授。从事图像处理,计算机图形学基础算法及医学领域应用方面的研究。工学博士。



西田友是

1973年,获广岛大学工学硕士学位。同年,任职于松田公司(株)工作。1979年,任福山大学工学部电子电气学科讲师。1988年起,在美国的 Brigham Young 大学任研究员一年。1990年任福山大学教授。从事计算机图形学方面的研究。

主编、执笔者简历



宫田一乘

1984年,毕业于东北大学工学部应用物理学科。1986年,获东京工业大学硕士学位。同年,任职于日本IBM公司(株)东京基础研究所,现在,为该研究所主任研究员。从事计算机图形学、分形理论、自然形状的建模等方面的研究。



千叶则茂

1984年,获东北大学博士学位。同年,任东北大学助教。1986年,任仙台电波高等工业专科学校副教授。1987年,任岩手大学工学部副教授,1991年,任教授。从事算法、计算机图形学方面的研究。工学博士。



末永康仁

1973年,获名古屋大学博士学位,同年任职于NTT电气通信研究所。从事图像处理,图像识别,图像生成方面的研究。1985年3月后的一年,在美国的马萨诸塞州(Massachusetts)工科大学多媒体技术研究所任研究员。现在,任NTT人机界面研究所主研究员。工学博士。



福井一夫

1975年,获东京工业大学电子物理工程专业硕士学位。同年,在NHK任职。后又任职于甲府广播电视台,1979年起,任职于广播电视技术研究所。从事计算机图形学、图像处理装置等节目制作专用影像设备的研究和开发。现在,任广播电视技术研究所前端制作技术研究部主任研究员。

主编、执笔者简历

平 正昭



曾任职于 CM Production 公司,参加了日本最早的 CG 产品 JCGL(日本计算机图形库)的研究工作。之后,任职于 TOYOLINKS(现在的(株)LINKS 公司),直到现在。

小堀 研一



1975 年,获山梨大学工学硕士学位。同年,任职于夏普公司,从事 CAD,CG 方面的研究开发工作。1991 年,任大阪工业大学电子工程学科副教授,从事 CAD、虚拟现实应用方面的研究。工学博士。